

**VŠB - Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**  
**Katedra elektroenergetiky**

Výroba elektrické energie spalováním bioplynu  
Electric power generation by using biogas combustion

## Zadání bakalářské práce

Student:

**Tomáš Serafin**

Studijní program:

B2649 Elektrotechnika

Studijní obor:

3907R001 Elektroenergetika

Téma:

Výroba elektrické energie spalováním bioplynu  
Electric power generation using biogas combustion

Zásady pro vypracování:

1. Zdroje bioplynu a technologie pro jeho získávání
2. Využití bioplynu pro výrobu elektřiny v kogeneračních jednotkách
3. Měření na vybrané bioplynové stanici (BPS)
4. Vyhodnocení naměřených dat

Seznam doporučené odborné literatury:

1. Straka, F.: Bioplyn, Praha, 2006.
2. Schulz, H., Eder, B.: Bioplyn v praxi : teorie - projektování - stavba zařízení, Ostrava, 2004.
3. Tabašek, M.: Energetické využití bioplynu v kogenerační jednotce se spalovacím motorem, Ostrava, 2007.
4. Kapitolová, M.: Bioplynová stanice s kogenerací a následné využití bioplynu, Ostrava, 2008.
5. Krbek, J., Polesný, B.: Kogenerační jednotky - zřizování a provoz, Praha, 2007.
6. Dvorský E., Hejtmánková P. : Kombinovaná výroba elektrické a tepelné energie, Praha, 2005
7. Janša, J.: Bioplyn a jeho využití v kogeneraci, Bakalářská práce, Ostrava, 2010
8. Jak fungují bioplynové stanice <<http://www.ekobonus.cz/jak-funguji-bioplynove-stanice-ukazkovy-priklad-zajimaveho-reseni-z-trebone>>

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Petr Moldřík, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2013

Datum odevzdání: 07.05.2014

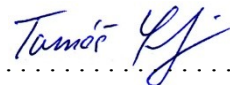
prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.  
vedoucí katedry



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.  
děkan fakulty

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne 7. května 2014

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Tomáš Serafin', written over a dotted line.

Tomáš Serafin

Děkuji Ing. Petru Moldříkovi, Ph.D. za cenné připomínky, vstřícný přístup a odborné vedení při zpracování mé bakalářské práce.

## **Abstrakt**

Tato bakalářská práce se zabývá bioplynem a jeho praktickým využitím v kogeneraci. V první části práce je popsán vznik bioplynu včetně podmínek, které musí být pro jeho tvorbu splněny, a vlivů okolí na jeho kvalitu. Dále práce uvádí všechny nejvýznamnější zdroje bioplynu, přičemž v příložených tabulkách je pro jednotlivé zdroje uváděna jeho výtěžnost. Následuje kapitola zkoumající jednotlivé technologické postupy při získávání bioplynu z biomasy a jejich výhody a nevýhody. Posléze se zabývám metodami přeměny bioplynu na elektrickou energii, uvádím přednosti jednotlivých metod a oblasti možného použití. Závěrem nahlížím na konkrétní technické řešení vybrané bioplynové stanice a v rámci praktické části provádím měsíční měření a analýzu kvality elektrické energie, kterou daná bioplynové stanice dodávala do elektrizační soustavy.

## **Klíčová slova**

Alternativní zdroje energie, bioplyn, biomasa, ČSN EN 50160, kogenerace, kogenerační jednotky, spalování bioplynu, vyhodnocení kvality elektrické energie.

## **Abstract**

This bachelor thesis deals with biogas and its practical use in cogeneration. First part of the thesis describes the creation of biogas, including the conditions that must be fulfilled for its creation, and environmental influences on its quality. The thesis also presents all the most important sources of biogas, while the attached tables for each individual source reported his recovery. The following chapter explores individual technological procedures for obtaining biogas from biomass, and their advantages and disadvantages. Then I deal with methods of converting biogas into electric power, state the advantages of the individual approaches and their potential application. Finally, I look at the specific technical solution of the selected biogas station and within the practical part I make monthly measurement and analysis of power quality, which this specific biogas station supplied to the power system.

## **Key words**

Alternative power sources, biogas, biomass, ČSN EN 50160, cogeneration, cogeneration units, biogas combustion, power quality assessment.

## Seznam zkratek

BPS	bioplynová stanice
CH <sub>4</sub>	metan
ČR	Česká republika
e <sup>-</sup>	elektron
ES	elektrizační soustava
H <sub>2</sub>	vodík
KGJ	kogenerační jednotka
kW <sub>E</sub>	kilowatt elektrického výkonu
kW <sub>T</sub>	kilowatt tepelného výkonu
O <sub>2</sub>	kyslík
obj. %	objemové procento
org.	organický
P <sub>lt</sub>	dlouhodobá míra flikru
PJ	primární jednotka
ppm	jedna miliontina
THD	činitel harmonického zkreslení
U <sub>n</sub>	jmenovité napětí
VN	vysoké napětí
ZD	zemědělské družstvo

## Obsah

1	Úvod .....	1
2	Bioplynový proces .....	2
2.1	První historické zmínky o bioplynové technice .....	2
2.2	Vznik bioplynu .....	2
2.3	Vliv prostředí .....	4
2.3.1	Kyslík .....	4
2.3.2	Teplota .....	4
2.3.3	Hodnota pH .....	5
2.3.4	Přísun živin a inhibitory .....	5
2.4	Provozní parametry .....	6
2.4.1	Promíchávání nádrže .....	6
2.5	Výtěžek plynu .....	6
2.6	Kvalita bioplynu .....	7
3	Zdroje bioplynu .....	8
3.1	Zemědělské bioplynové stanice .....	8
3.1.1	Statková hnojiva .....	8
3.1.2	Energetické plodiny .....	8
3.1.3	Substráty z dále zpracovávajícího zemědělského průmyslu .....	9
3.2	Průmyslové bioplynové stanice .....	10
3.3	Komunální bioplynové stanice .....	11
3.3.1	Skládkový plyn .....	11
4	Technologie získávání bioplynu .....	12
4.1	Způsob plnění fermentoru .....	12
4.1.1	Dávková metoda .....	12
4.1.2	Metoda střídání nádrží .....	13
4.1.3	Průtoková metoda .....	13
4.1.4	Zásobníková metoda .....	14
4.1.5	Kombinovaná průtoková metoda se zásobníkem .....	14
4.2	Počet procesních stupňů a procesní teplota .....	15
4.3	Fermentace podle obsahu sušiny .....	15
4.3.1	Metoda mokré fermentace .....	16
4.3.2	Metoda suché fermentace .....	17
5	Pojem kogenerace a kogenerační jednotka .....	18
5.1	Definice kombinované výroby .....	18
5.2	Výhody kombinované výroby energií .....	18
5.3	Zařízení kogenerační jednotky .....	19

6	Primární jednotky bioplynového kogeneračního soustrojí .....	20
6.1	Parní turbíny .....	20
6.2	Plynové turbíny .....	21
6.2.1	Mikroturbíny .....	22
6.3	Spalovací motory .....	22
6.3.1	Princip spalovacího motoru .....	23
6.3.2	Spalovací motory na bioplyn .....	23
6.3.3	Způsoby využití odpadního tepla .....	24
6.3.4	Spolehlivost spalovacích motorů .....	24
6.4	Stirlingův motor .....	25
6.5	Elektrické generátory .....	25
6.6	Palivové články .....	26
6.7	Srovnání primárních jednotek .....	27
7	Analýza výroby elektrické energie v konkrétní bioplynové stanici .....	28
7.1	Provozní řešení a technické parametry bioplynové stanice .....	28
7.2	Prostředky pro měření elektrické energie a analýzu její kvality .....	29
7.2.1	Norma ČSN EN 50160 .....	29
7.3	Vlastní analýza kvality generované elektrické energie .....	30
7.3.1	Velikost a odchylky napájecího napětí .....	30
7.3.2	Kmitočet sítě .....	31
7.3.3	Harmonická napětí .....	31
7.3.4	Nesymetrie napájecího napětí .....	33
7.3.5	Míra vjemu flikru .....	34
7.4	Výkon dodaný do elektrizační soustavy .....	34
7.5	Shrnutí .....	39
8	Závěr .....	40
	Použitá literatura .....	41
	Seznam obrázků .....	43
	Seznam tabulek .....	44
	Seznam příloh .....	45



## 1 Úvod

Elektrická energie je pro současný svět nepostradatelná, poněvadž si lidstvo zvyklo využívat technické vymoženosti, které mu usnadňují a zpříjemňují život. Tyto výdobytky moderní doby jsou velkými spotřebiči elektrické energie a každým rokem jich celosvětově přibývá, čímž roste množství elektrické energie, kterou je třeba pro jejich činnost vyrobit. Je dlouhodobě známo, že fosilní paliva, jež plní funkci základního zdroje elektrické energie, nenávratně ubývají. Lidstvo se spotřeby elektrické energie kvůli svému pohodlí vzdát ale nechce, a proto se už po delší dobu zabývá tzv. obnovitelnými zdroji, které mají prozatím úplné vyčerpání fosilních paliv přinejmenším oddálit. Svým způsobem se na první pohled obnovitelné zdroje zdají být velmi výhodné, avšak mají i svá úskalí. Stále nejsme schopni elektrickou energii ve větší míře uchovávat, takže její okamžitá výroba musí být rovna okamžité spotřebě. Tento fakt je v případě tradiční solární a větrné energie velmi stinný. Počasí člověk neporučí a tak často může nastávat nedostatek nebo přebytek energie v síti, což v obou případech znamená značné komplikace. Existují ale také zdroje obnovitelné energie, které určitou regulaci výkonu umožňují. Tím prvním způsobem je zdroj energie známý už od nepaměti - voda. Dalším takovým je bioplyn, který vzniká při biologických rozkladech, což je v přírodě naprosto běžný jev. V České republice se celkový počet stanic, které vyrábí elektrickou energii spalováním bioplynu, neustále zvyšuje. K letošnímu roku jich je cirká 500, přičemž jejich celkový instalovaný výkon převyšuje 400 MW. Pokud bychom se zaměřili na Evropu, tak výkon ze všech evropských bioplynových stanic o 44 % převyšuje roční výrobu jaderné elektrárny Temelín. Například vláda v sousedním Německu odhaduje, že v budoucnu by zisk elektrické energie z bioplynových stanic mohl být až 17 TWh elektrické energie ročně, což by stačilo na pokrytí spotřeby 4,4 miliónu německých domácností. [15] Z těchto údajů je zřejmé, že výroba elektrické energie z bioplynu má nemalý potenciál a stojí za to se o ní zajímat.

Tato práce popisuje vznik bioplynu a jeho možné zdroje. Vysvětluje, jakými technikami se dá bioplyn získat a co je k tomu zapotřebí. Dále jsou uvedeny nejznámější metody a technologie jeho spalování v rámci kogenerace. Součástí je také srovnání těchto metod a uvedení výhod jejich použití.

V rámci praktické části je zhotovena závěrečná kapitola, která se zabývá konkrétní bioplynovou stanicí. V úvodu kapitoly je popsáno její technické řešení a dále pak následuje měsíční měření elektrické energie, kterou bioplynová stanice dodávala do sítě. Protože je elektrická energie nejušlechtlejší formou energie vůbec, je nutné dbát na její standardy kvality, které jsou definovány příslušnou normou. Součástí závěrečné části je naměřená data elektrické energie analyzovat a vyhodnotit, zda vyhověla požadavkům této normy.

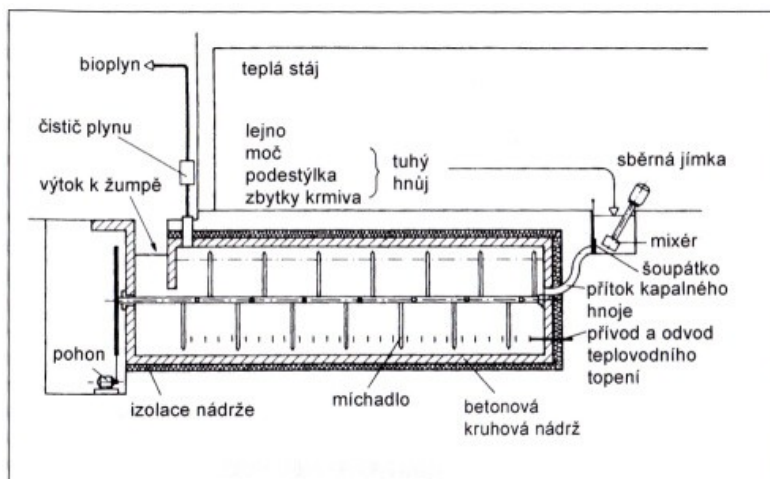
## 2 Bioplynový proces

### 2.1 První historické zmínky o bioplynové technice

První známé výzkumy bioplynu jsou staré téměř 250 let. Už okolo roku 1770 italský přírodovědec Alessandro Volta, který zkoumal elektrický proud a je po něm nazvána jednotka elektrického napětí, se zabýval pokusy spalování bahenního plynu. V roce 1821 italský fyzik Amedeo Avogadro sestavil chemický vzorec metanu ( $\text{CH}_4$ ). O dalších 23 let později francouzský bakteriolog Pasteur přišel na to, jak bioplyn prakticky využít. Koňský hnůj z městských povozů využil k výrobě plynu pro pouliční osvětlení. Důležitý mezník se datuje do roku 1907, kdy bylo v Bombaji postaveno první zařízení, v němž byl plyn použit pro pohon motorů generujících elektrický proud.

V dalších letech šel výzkum a využití kalového plynu rychlým tempem vpřed. Byly vyvinuty plovoucí plynové zvony, výkonná míchadla a topné systémy, což vedlo ke zvýšení vyhnívacího výkonu. Další pokusy byly prováděny v Německu před a během 2. světové války, kdy byla zvýšena poptávka po „pohonném plynu“. Němci zkoušeli zvýšit výrobu plynu přidáním pevných organických odpadních materiálů (jako lignin, rostlinný a obilný odpad), což přineslo úspěch.

Karl Imhoff v roce 1947 upozornil na fakt, že z chlévské mrvy od jedné krávy lze vyprodukovat až stokrát více plynu, než z usazenin odpadních vod po jednom obyvateli města. V téže roce bylo na Technické univerzitě v Darmstadtu vyvinuto bioplynové zařízení pro menší zemědělské provozy, známé jako „systém Darmstadt“. V roce 1959 na tomto principu postavil Reusch v Hohensteinu bioplynovou stanici, která je po různých úpravách v provozu dodnes. [1] Na obrázku č. 1 je průřez stanice typu Reusch zobrazen.



Obr. č. 1 - Průřez bioplynovou stanicí typu Reusch

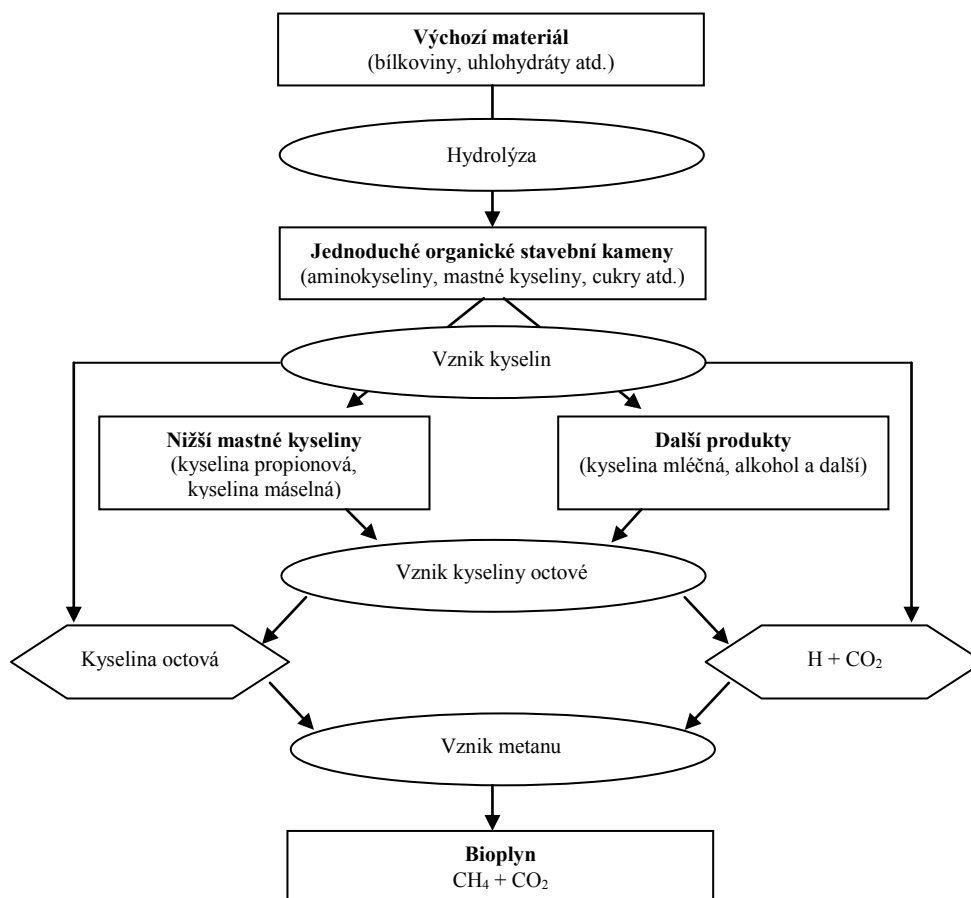
### 2.2 Vznik bioplynu

Bioplyn je produktem biologického procesu, který se děje pouze v anaerobním prostředí. Proces přeměny podle toho také označujeme jako anaerobní a znamená to, že se tak děje pouze v prostředí, kde není přítomen kyslík. Bez kyslíku se z organické hmoty vytváří žádána směsice plynů

(bioplynů). Tento proces je v přírodě velice rozšířený, děje se na dnech jezer, v rašeliništích, v jímce s kejdou, či v bachoru přežvýkavců. Účinnost přeměny je značně velká, valná většina organické hmoty je přeměněna na bioplyn a jen malé množství na novou biomasu či teplo.

Samotný proces vzniku bioplynu můžeme rozdělit na 4 fáze - hydrolýzu, acidogenezi, acetogenezi a metanogenezi. Celý tento děj obecně nazýváme biometanizace. Celý proces je schematicky zobrazen na obrázku č. 2.

1. Během **hydrolýzy** dochází k rozkladu komplexních sloučenin výchozího materiálu (polysacharidy, bílkoviny a tuky) na jednodušší organické sloučeniny (cukry, aminokyseliny a mastné kyseliny). Podílejí se na tom bakterie uvolňující enzymy, které materiál rozkládají biochemickou cestou.
2. Při **acidogenezi** jsou meziproducty hydrolýzy kyselinotvornými bakteriemi rozkládány na nižší mastné kyseliny (octovou, propionovou a máselnou) a na oxid uhličitý a vodík.
3. Dále jsou tyto producty během **acetogeneze** přeměněny na prekursor (kyselinu octovou, vodík a oxid uhličitý). Kvůli vyšší přítomnosti vodíku musí producenti kyseliny octové vytvořit s bakteriemi metanogeneze těsné životní společenství.
4. V poslední fázi - **metanogenezi** - je z kyseliny octové, oxidu uhličitého a vodíku tvořen metan. Tento krok mají na starost metanové bakterie. [2]



Obr. č. 2 - Schematické zobrazení anaerobního rozkladu

Probíhají-li fáze acidogeneze a metanogeneze ve zcela oddělených reaktorech, hovoříme o procesu dvoufázovém. V opačném případě se vždy jedná o proces jednofázový. Je-li však jednofázový proces realizován např. ve třech sériových reaktorech, označujeme ho jako proces jednofázový, třístupňový. Tyto „stupně“ tedy udávají počet samostatných propojených reaktorů, bez ohledu na to, zda se jedná o sériové či paralelní řazení. [3]

Pokud organickou hmotu do reaktoru plníme kontinuálně (tak jak je tomu u většiny bioplynových stanic), probíhají všechny čtyři fáze biometanizace vedle sebe a nejsou odděleny ani místně ani časově. Výjimka je při rozběhu bioplynové stanice, u dávkových (nespojitéch procesů) a u vícestupňových bioplynových stanic, kdy probíhají fáze rozkladu odděleně. Po zahájení provozu stanice může až několik týdnů trvat, než nastane čtvrtá fáze - metanogeneze, tedy tvorba samotného metanu, a než se vznikající plyn stane hořlavý. [1]

## 2.3 Vliv prostředí

Nejdříve je důležité zmínit, že existují dvě technologické varianty fermentačních zařízení produkující bioplyn. Jedná se o mokrou a suchou fermentaci. Obě technologie se vyznačují svými výhodami a nevýhodami a každá je určena pro jiné substráty. Rozdíly mezi oběma fermentacemi budou popsány v kapitole 4.3. Nyní je zapotřebí si uvědomit fakt, že rozlišení mezi fermentací mokrou a suchou je důležité pro popis podmínek prostředí.

### 2.3.1 Kyslík

Metanové bakterie jsou velmi staré. Obývaly Zemi ještě před vznikem atmosféry, proto jsou dodnes odkázány na bezkyslíkové životní prostředí. Některé druhy bakterií vymírají už při jeho nepatrném množství. Nelze se však vyvarovat občasnému zanesení kyslíku do nádrže fermentoru, přičemž k inhibici metanových bakterií či k jejich úmrtí nedochází. Je to dáno tím, že metanové bakterie žijí ve společenství s bakteriemi z předchozích kroků rozkladu. Ty spotřebují kyslík dříve, než by jeho přítomností mohly být ohroženy samotné metanogenní bakterie. Důležitý je však předpoklad, že toto množství kyslíku je omezené. [3]

### 2.3.2 Teplota

Metanové bakterie pracují při teplotách v rozmezí 0 až 70 °C. Při nižších teplotách sice bakterie přežívají, ale stávají se neaktivními. Naopak při vyšších teplotách bakterie hynou. Výjimkou je několik kmenů bakterií, které mohou žít při teplotě až 90 °C. [1]

Bakterie lze rozdělit do tří skupin podle jejich teplotních optim. První skupinou jsou psychofilní bakterie, kterým vyhovují nízké teploty do 25 °C. Při těchto teplotách není nutné fermentor vyhřívat, na druhou stranu ale klesá jeho výkon a výroba bioplynu je silně snížena. Druhá skupina bakterií je v praxi rozšířena nejvíce, své teplotní optimum má v rozmezí 32 až 42 °C a označuje se jako mezofilní. Její časté využití je opodstatněno dobrou pracovní stabilitou a poměrně vysokým výtěžkem bioplynu. Třetí skupinou jsou termofilní kultury bakterií, které mají své teplotní

optimum mezi 50 a 57 °C. Takhle vysoká teplota je výhodná, mají-li být v substrátu v rámci hygienizace zničeny všechny zdraví škodlivé zárodky. Díky vyšší teplotě je zároveň zajištěn větší výtěžek bioplynu. Abychom však zajistili vyšší teplotu ve fermentoru, je třeba dodat více energie na jeho vytápění. Fermentační proces je při vyšší teplotě náročnější na provozní podmínky, jako je citlivost na změnu teploty, pravidelnost v dodávkách substrátu či provozní způsob fermentoru.

Bakterie při své práci produkují jen minimum vlastního tepla, které by na dosažení teplotního optima v případě mezofilních a termofilních bakterií nestačilo. Proto musí být pro zajištění ideálních podmínek fermentor izolován a externě vytápěn. [3]

### 2.3.3 Hodnota pH

Všechny bakterie z jednotlivých fází biometanizace mají své rozdílné hodnoty pH, které jim svědčí a při kterých mohou optimálně růst. Ideální hodnota pH pro hydrolyzující a kyselinotvorné bakterie je 4,5 až 6,3. Na tuto hodnotu ale nejsou bezpodmínečně odkázány a zvládnou přežít i při jejím mírném navýšení, přičemž jejich aktivita je zbrzděna jen nepatrně. Bakterie vytvářející kyselinu octovou a metan potřebují pro své přežití hodnotu pH v neutrální oblasti, což je 6,8 - 7,5. V případě jednofázového procesu, tedy když se fermentační proces koná v jednom fermentoru, musí být tato neutrální oblast pH dodržena.

Většinou se hodnota pH na své optimum v jednofázovém i dvoufázovém procesu nastaví samovolně prostřednictvím alkalických a kyselých produktů látkové výměny, které jsou vytvářeny během aerobního rozkladu. Pokud však hodnota pH poklesne, metanové bakterie jsou ve své aktivitě utlumeny. Metanogenní rozklad neprobíhá s dostatečnou rychlostí, dochází k nakupení kyselin z acidogeneze, čímž hodnota pH poklesne ještě více a metanové bakterie zcela zastaví svou činnost. Když je takový pokles pH zaznamenán, je nutné omezit přísun substrátu, aby bakterie měly dostatek času rozložit přítomné kyseliny. Eventuálně se u kyselých substrátů jako jsou např. výpalky, syrovátka a siláž pro navýšení hodnoty pH přidává vápno. [3]

### 2.3.4 Přísun živin a inhibitory

Metanové bakterie pro svou buněčnou stavbu potřebují rozpustné dusíkaté sloučeniny, minerální látky a stopové prvky. Stopové prvky a živiny jako železo, kobalt, nikl, molybden, selen a wolfram jsou pro přežití a růst bakterií velmi důležité. V hnoji a kejdě je takových látek dostatek. Také tráva, obsah bachoru přežvýkavců, zbytky jídla, kuchyňské odpadky, mláto či syrovátka obsahují všechny živiny v dostatečné míře. V praxi je však přesto doporučeno použití hnoje a kejdy jako stálého základu substrátu a ostatních jmenovaných látek jen jako přísad, což napomáhá k vyrovnaní poměru kyselosti a zásaditosti. Kolik metanu se dá z daného substrátu výsledně získat je dáno podíly proteinů, tuků a sacharidů.

Pro stabilní průběh procesu je důležité, aby byl dodržován správný poměr uhlíku a dusíku v daném substrátu. Pokud by substrát obsahoval příliš mnoho uhlíku, tak jeho přebytek by nemohl být

přeměněn a nebylo by pak možné využít plný potenciál daného substrátu pro získání bioplynu. Pokud by byla situace opačná a substrát by oplýval nadbytkem dusíku, tak by zase hrozilo riziko zvýšené tvorby amoniaku, což brzdí růst bakterií a může ohrozit celý proces. Aby bakterie byly dostatečně zásobeny živinami, měl by být poměr  $C : N : P : S = 600 : 15 : 5 : 1$ . [3]

## 2.4 Provozní parametry

V popředí každého provozovatele BPS jsou především ekonomické zájmy. Hodlá-li tedy provozovat BPS, nesnaží se bezpodmínečně o maximální výtěžek plynu nebo o úplný rozklad veškeré organické hmoty v substrátu. Pokud by provozovatel měl tento záměr, pobyt substrátu ve fermentoru by byl značně dlouhý, což vyžaduje fermentační nádrž velkého objemu a tím vyšší finanční náklady. Provozovatel se tedy spokojí s neúplným získáním plynu, jenž však získá za kratší dobu. Nutností je tedy nalézt optimum mezi mírou rozkladu a ekonomickými aspekty. [3]

### 2.4.1 Promíchávání nádrže

Pokud bychom nechali substrát v nádrži pouze volně ležet, tak by vlivem rozdílných hustot jednotlivých látek v substrátu vznikaly vrstvy. Velká část bakterií by se kvůli vysoké hustotě zdržovala ve spodní části nádrže, zatímco rozkládaný substrát by se hromadil nahoře. Tyto dvě složky by se tedy dotýkaly jen v jakési hraniční, přechodové oblasti, čímž by byl rozklad značně omezen. Plyn, který by i přes tyto nepříznivé podmínky vznikal, by navíc obtížně vyvěral, protože naplavené látky ve vrchní vrstvě nejsou příliš propustné. Tento problém se řeší promícháváním, čímž se podporuje vyšší kontakt bakterií se substrátem. V praxi se nádrž promíchává v určitých krátkých intervalech. Kdyby bylo promíchávání nepatříčně časté a prudké, velké síly by mohly zničit úzké životní společenství metanogenních bakterií a bakterií tvořící kyselinu octovou. Proto promíchávání nesmí být přehnané a proto je čas, kdy se celý obsah fermentoru promíchá, omezený a předem definovaný. [3]

## 2.5 Výtěžek plynu

Množství bioplynu, jenž se vyprodukuje v BPS, je dáno složením substrátu. V praxi nelze složení substrátu přesně určit, tudíž předem nemůžeme stanovit ani množství vyprodukovaného bioplynu. Můžeme ale provést výpočet, který vychází z hodnot při 100 % rozkladu organické substance, kterého však není nikdy dosaženo. Vzhledem k tomu, že mezi rozkladnými procesy ve fermentoru a trávícími pochody přežvýkavců existuje podobnost, může být vypočten teoretický výtěžek bioplynu na základě obsahových látek a jejich stravitelnosti. Tvorbu bioplynu lze tedy odhadnout z krmiva např. podle obsahu bílkovin, tuků a sacharidů. Tato metoda je pouze orientační a proto na ní nemohou spoléhat např. ekonomické kalkulace.

Následující tabulka č. 1 pro představu zobrazuje výtěžnost plynu a obsah metanu podle látek obsažených v substrátu. [3]

Tab. č. 1 - Specifický výnos bioplynu a obsah metanu

	Výtěžnost bioplynu (l/kg oOS)	Obsah metanu (Obj. - %)
Stravitelné bílkoviny	600 - 700	70 - 75
Stravitelný tuk	1000 - 1250	68 - 73
Stravitelné sacharidy a polysacharidy	700 - 800	50 - 55

## 2.6 Kvalita bioplynu

Kvalita bioplynu je především dána poměrem „užitečného“ hořlavého metanu k „neužitečnému“ oxidu uhličitému. Protože oxid uhličitý zředí bioplyn, což má za následek nárůst nákladů převážně při skladování bioplynu, je nutné usilovat o jeho co možná nejmenší podíl v bioplynu. Obecně tedy platí, že čím více metanu bioplyn obsahuje, tím je kvalitnější, poněvadž obsahuje více potenciálně využitelné energie. [1]

Literatura udává, že podíl metanu v bioplynu je v rozmezí 50 - 75 %, podíl oxidu uhličitého je 25 - 45 % a malou část zabírají vodní páry a stopové složky (viz tab. č. 2). Dá se však přibližně říci, že metan je v bioplynu zastoupen dvěma třetinami a oxid uhličitý jednou třetinou. [3]

Tab. č. 2 - Průměrné složení bioplynu

Podíl	Koncentrace
Metan (CH <sub>4</sub> )	50 - 75 obj. %
Kyslík uhličitý (CO <sub>2</sub> )	25 - 45 obj. %
Voda (H <sub>2</sub> O)	2 - 7 obj. % (20-40 °C)
Sírovodík (H <sub>2</sub> S)	20 - 20000 ppm
Dusík (N <sub>2</sub> )	< 2 % obj.
Kyslík (O <sub>2</sub> )	< 2 % obj.
Vodík (H <sub>2</sub> )	2 % obj.

### 3 Zdroje bioplynu

Bioplynové stanice můžeme rozdělit podle jejich vstupů, tedy podle toho, jakou biomasu zpracovávají, na tři typy stanic:

- Zemědělské BPS - využívají biomasu ze zemědělství
- Průmyslové BPS - často využívají rizikové vstupy
- Komunální BPS - zpracovávají komunální bioodpady

#### 3.1 Zemědělské bioplynové stanice

Ve fermentorech se jako substrát používá zemědělský materiál, tedy konkrétněji statková hnojiva (keřda, hnůj) nebo energetické plodiny (kukuřice, řepa, travní siláž). V České republice jsou právě zemědělské BPS nejhojněji zastoupeny. Nejčastěji bývají postaveny přímo v areálech zemědělských provozů. Konceptuálně se jedná o jednodušší zařízení, než je tomu u jiných BPS, takže uvedení do činnosti není nijak zvlášť problematické. [6]

##### 3.1.1 Statková hnojiva

Přestože počet dobytka v České republice klesá, stále tato hnojiva tvoří významný potenciál substrátů pro získání bioplynu (viz tab. č. 3). Keřda skotu a prasat obsahuje malý obsah sušiny, takže je dobře pumpovatelná a dá se dobře kombinovat s ostatními substráty. [3]

Tab. č. 3 - Obsah sušiny, výtěžek plynu a obsah metanu statkových hnojiv

Substrát	Sušina	Org. Sušina	Výtěžnost plynu		Obsah metanu
	(%)	(% sušiny)	m <sup>3</sup> /t substrátu	m <sup>3</sup> /t org. sušiny	(Obj. %)
Keřda skotu	8 - 11	75 - 82	20 - 30	200 - 500	60
Keřda prasat	cca 7	75 - 86	20 - 35	300 - 700	60 - 70
Hnůj skotu	cca 25	68 - 76	40 - 50	210 - 300	60
Hnůj prasat	20 - 25	75 - 80	55 - 65	270 - 450	60
Hnůj kuřat a slepic	cca 32	63 - 80	70 - 90	250 - 450	60

##### 3.1.2 Energetické plodiny

Jedná se o rostliny, které jsou cíleně pěstovány pro získávání energie. Existuje mnoho druhů těchto plodin a energie se z nich získává více způsoby od přímého spalování, zplynování až po anaerobní digesce. Obecně se pro tyto plodiny vžil název biomasa.

- **Kukuřice** - se vyznačuje svým vysokým výnosem energie na hektar půdy. Některé BPS umí zpracovat kukuřičnou siláž bez dalších substrátů, avšak doporučuje se fermentovat ji s keřdou, aby byl průběh procesu stabilnější.
- **Řepa** - je také pro produkci bioplynu výhodná, protože má vysoký výnos hmoty. Cukrová řepa má výnos v rozmezí 50-60 t/ha. Řepa je však kvůli svým vysokým nárokům na půdu a podnebí poměrně náročná na pěstování.



- **Žitná siláž z celých rostlin** - pro svou nenáročnost na kvalitu půdy a podnebí může být pěstována i v chladnějších oblastech. Výnos čerstvé hmoty činí 13-15 t/ha. [3]

Výnos bioplynu z jednotlivých plodin je shrnut v tabulce č. 4.

Tab. č. 4 - Obsah sušiny, výtěžek plynu a obsah metanu energetických plodin

Substrát	Sušina	Org. Sušina	Výtěžnost plynu		Obsah metanu
	(%)	(% sušiny)	m <sup>3</sup> /t čerstvé hmoty	m <sup>3</sup> /t sušiny	(Obj. %)
Kukuřičná siláž	20 - 35	85 - 95	170 - 200	450 - 700	50 - 55
Žito-siláž	30 - 35	92 - 98	170 - 220	550 - 680	cca 55
Cukrová řepa	23	90 - 95	170 - 180	800 - 860	53 - 54
Krmná řepa	12	75 - 85	75 - 100	620 - 850	53 - 54

### 3.1.3 Substráty z dále zpracovávajícího zemědělského průmyslu

Jedná se o takové substráty, které vznikají při výrobě určitého produktu jako odpad.

- **Výroba piva** - při jeho výrobě vznikají různé vedlejší produkty, přičemž nejvíce je zastoupené mláto. Na každý hektolitr uvařeného piva vzniká 19,2 kg mláta.
- **Výroba alkoholu** - se provádí z obilí, brambor nebo ovoce. Na každý litr alkoholu připadá dvanáctinásobné množství výpalků, které se dnes převážně používají jako krmivo pro dobytek nebo jako hnojivo.
- **Výroba škrobu** - se provádí z brambor. Během výroby škrobu vznikají tzv. bramborové zdrtky (dřeň), které se skládají ze slupek, buněčných slupek a nerozpuštěných škrobových buněk. Těchto zdrtek vzniká asi 240 kg na každou tunu zpracovaných brambor. Zdrtky se obvykle podávají dobytku jako krmivo.
- **Výroba cukru** - při výrobě vznikají jako vedlejší odpad vyslazené řízky a melasa. Obojí je dobře zfermentovatelný materiál. Melasa se často používá v lihovarech nebo při výrobě droždí, takže zdroje bioplynu jsou omezeny jen na vyslazené řízky.[3]

Jaké množství bioplynu se dá z odpadů získat je uvedeno v tabulce č. 5.

Tab. č. 5 - Obsah sušiny, výtěžek plynu a obsah metanu substrátů ze zemědělského průmyslu

Substrát	Sušina	Org. Sušina	Výtěžnost plynu		Obsah metanu
	(%)	(% sušiny)	m <sup>3</sup> /t čerstvé hmoty	m <sup>3</sup> /t sušiny	(Obj. %)
Pivovarské mláto	20 - 25	70 - 80	105 - 130	580 - 750	59 - 60
Výpalky - obilné	6 - 8	83 - 88	30 - 50	430 - 700	58 - 65
Výpalky bramborové	6 - 7	85 - 95	36 - 42	400 - 700	58 - 65
Výpalky - ovocné	2 - 3	cca 95	10 - 20	300 - 650	58 - 65
Bramborové zdrtky	cca 13	cca 90	80 - 90	650 - 750	52 - 65
Vyslazené řízky	22 - 26	cca 95	60 - 75	250 - 350	70 - 75
Melasa	80 - 90	85 - 90	290 - 340	360 - 490	70 - 75

### 3.2 Průmyslové bioplynové stanice

Průmyslové BPS zpracovávají zcela nebo částečně rizikový vstupní materiál, jakým jsou např. jateční odpady nebo kaly z čističek odpadních vod. Kvůli vlastnostem těchto vstupních materiálů jsou kladeny vyšší nároky na technologii zpracování a plnění provozních podmínek, zejména dodržování hygienických pravidel. [3]

**Průmyslové odpadní vody** – mívají vysokou koncentraci organického znečištění. V organických nečistotách tkví energie, kterou můžeme dvěma metodami získat. Jedná se o technologie aerobní a anaerobní a jejich hlavní rozlišnost tkví ve výtěžnosti bioplynu. Při přímé anaerobní metodě, kdy se bioplyn získává hned z odpadní vody, je výtěžnost bioplynu z organických nečistot až 90 % (reálně 50 až 80 %). Při aerobní metodě, kdy se z odpadní vody nejdříve aerobní formou získá nová biomasa a z ní teprve lze anaerobní stabilizací získat bioplyn, je možný zisk bioplynu 60 % (reálně 20 až 40 %). Aerobní metodou se čistí vody, které mají menší koncentraci organického znečištění např. splaškové vody. Rozšířenější je anaerobní metoda, její reaktory jsou vytvořeny na základě specifických vlastností odpadních vod. V odpadních vodách převažují rozpuštěné organické látky, takže první fáze anaerobního rozkladu (hydrolýza) probíhá podstatně rychleji. Tím se posléze zrychluje celý rozkladný proces a klesá doba zdržení odpadní vody v reaktoru. Díky vyššímu hydraulickému zatížení a nižší viskozitě odpadních vod oproti kalům a podobným „hustším“ materiálům zpravidla v moderních reaktorech odpadá potřeba promíchávání.

V mnoha průmyslových odvětvích je dnes technologie anaerobního rozkladu základem čištění znečištěných vod. Konkrétně mezi takové odvětví patří cukrovary, pivovary, škrobárny, lihovary, aj. Vývoj jde stále vpřed a anaerobní technologie čištění odpadních vod se začíná prosazovat už i v odvětvích, které vytváří obtížněji čistitelnou odpadní vodu jako např. ve farmaceutickém, chemickém či petrochemickém průmyslu. [7]

V tabulce č. 6 je uveden energetický potenciál splaškových vod z jednotlivých odvětví průmyslu. Energetický potenciál je dán podílem množství získaného bioplynu a množství odpadní vody, ze které je bioplyn získán.

*Tab. č. 6 - Míra energetického potenciálu bioplyn v jednotlivých průmyslových odvětvích*

Typ odpadní vody	Energetický potenciál (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )
Splaškové	0,2
Farmaceutické	4,2
Cukrovarské	5
Škrobářenské	7,6
Melasové výpalky	25
Výroba threoninu	32
Výroba sirupů	60
Výroba bionafty	80

### 3.3 Komunální bioplynové stanice

„Palivem“ do těchto typů BPS bývají komunální odpady. Komunální odpad vytváří každá domácnost např. ve formě potravinových zbytků. Tyto zbytky produkují i jídelny či restaurace, čili mezi producenty komunálního odpadu se řadí i živnostníci. Největší podíl ale spadá na odpadní materiál z údržby zeleně. Tráva a jiný porost se udržuje v každé obci či městě a tak ve středně velkých a velkých městech vznikají stovky tun materiálu ročně. Budeme-li počítat množství vyprodukovaného bioodpadu na osobu, tak v městských sídlištích padá na hlavu jednoho obyvatele 25 kg/rok a v zástavbě rodinných domů je produkce vyšší, asi 100 kg/rok. [3]

Tento odpad bývá často vnímán jako problém „kam s ním“. Všechno je biologicky rozložitelný, takže při určitých podmínkách lze uvažovat o jeho využití pro získání bioplynu (viz tab. č. 7). Komunální BPS jsou technologicky náročnější na zpracování vstupů, neboť odpad zapáchá. Je nutné pachovou zátěž okolí minimalizovat, tomu dopomáhají uzavíratelné haly s odtahem a čištěním vzduchu. [6]

Tab. č. 7 - Obsah sušiny, výtěžek plynu a obsah metanu komunálních odpadů

Substrát	Sušina	Org. Sušina	Výtěžnost plynu		Obsah metanu
	(%)	(% sušiny)	m <sup>3</sup> /t čerstvé hmoty	m <sup>3</sup> /t org. sušiny	(Obj. %)
Separovaný odpad	40 - 75	50 - 70	80 - 120	150 - 600	58 - 65
Zbytky pokrmů a prošlé potraviny	9 - 37	80 - 98	50 - 480	200 - 500	45 - 65
Odpady z údržby zeleně	cca 12	83 - 92	150 - 200	550 - 680	55 - 65

#### 3.3.1 Skládkový plyn

Při biologickém rozkladu některých organických látek uložených na skládce vzniká plyn. Vzhledem k původu je označován jako skládkový, a tak jako bioplyn je tvořen metanem a oxidem uhličitým. Intenzita jeho produkce závisí na odpadu, který se na skládce uchovává, a v jakém stádiu rozklad je. Plyn se produkuje 20 až 30 let po uložení odpadu. Nejvyšší produkce nastává během 5. až 13. roku uskladnění, přičemž jeho produkce nabývá 100 - 300 m<sup>3</sup> na tunu odpadu. Skládkový plyn je pro samotnou skládku nebezpečný, protože pokud by nebyl odčerpáván, hrozila by jeho akumulace, která by se vzduchem mohla tvořit výbušnou směs. Plyn částečně uniká pasivní formou, tedy vlivem vlastního tepla. Aktivní forma, umělé odčerpávání, nám umožňuje zachytit 20 - 70 % celkového množství vytvořeného plynu. Zachycený plyn se musí nejdříve přes filtry vyčistit a následně ho lze velmi všestranně a účinně využít pro tvorbu elektřiny, tepla či teplé vody. [8]

## 4 Technologie získávání bioplynu

Existuje mnoho řešení bioplynových zařízení, které se dají shrnout do několika typových technologických postupů. V zásadě se dají postupy rozlišovat podle:

- způsobu plnění
- počet procesních stupňů
- procesní teploty
- konzistence substrátu

### 4.1 Způsob plnění fermentoru

Způsoby plnění fermentoru substrátem mohou být v zásadě tři a to:

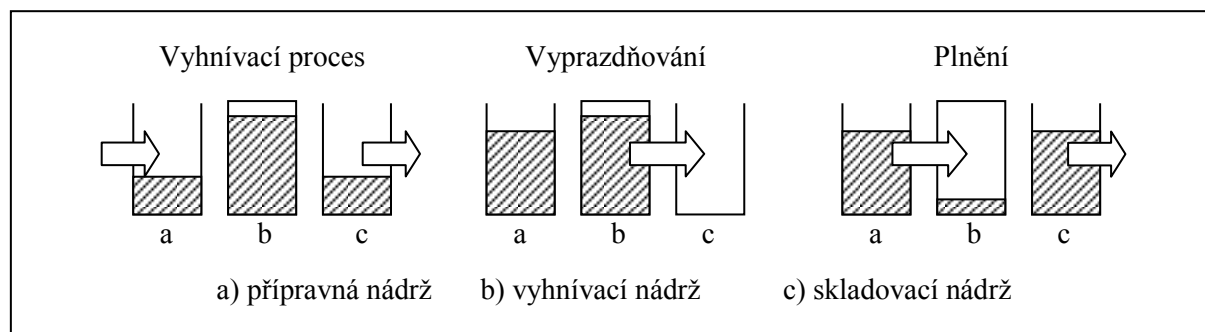
- **Kontinuální** - plnění fermentoru je plynulé, koná se průběžně i během fermentace. Zástupcem kontinuálního plnění je průtoková metoda. Produkce bioplynu se při tomto způsobu vyznačuje svou stálostí.
- **Diskontinuální** - fermentor se nejdříve najednou (dávková metoda) nebo postupně (metoda střídání nádrží) naplní, a až je zcela naplněn, pak začne fermentace. Reaktor je po celý průběh rozkladu uzavřen. Až je substrát dostatečně vyhnílý, teprve potom může být vyvezen a nahrazen novým. Produkce bioplynu při tomto způsobu není příliš stálá. Diskontinuální způsob plnění je typický zejména pro suchou fermentaci.
- **Semikontinuální** - během dne je do fermentoru mnohokrát dávkováno malé množství substrátu. Součet těchto dávek odpovídá denní vsázce. Reaktor je neustále naplněn. Dávkování probíhá automaticky a substráty jsou uloženy v zásobnících s denní či vícedenní kapacitou.

#### 4.1.1 Dávková metoda

U dávkové metody se fermentor naplní najednou a žádný substrát se v průběhu vyhnívání nepřidává ani neodebírá. Po ukončení doby kontaktu se fermentor najednou vyprázdní, přičemž se asi 5 až 10 % obsahu v nádrži ponechává, aby se do nové dávky substrátu zanesly vyvinuté bakterie a nový proces vyhnívání se tak urychlil. Abychom zajistili plnění a vyprazdňování vyhnívací nádrže jedním rázem, je zapotřebí mít vedle vyhnívací nádrže ještě nádrž přípravnou a skladovací. Tyto dvě pomocné nádrže musí být stejné velikosti jako nádrž vyhnívací, což přirozeně zvyšuje náklady. Na obrázku č. 3 je tento postup v jednotlivých krocích zaznačen.

Nevýhodou metody je nerovnoměrná výroba plynu, která zprvu po naplnění fermentoru pomalu roste, posléze dosahuje maxima a poté klesá. Dá se tomu předcházet využíváním dvou menších fermentorů, které se střídavě naplňují a vyprazdňují vždy po uplynutí poloviny doby kontaktu. Dvě malé nádrže jsou však dražší než jedna velká, takže tento způsob je poměrně drahý. Další nevýhodou jsou ztráty dusíku a metanu. Dochází k nim z důvodu dlouhého pobytu substrátu v přípravné nádrži, takže rozklad se zahájí ještě před přesunutím do samotné vyhnívací nádrže.

Dávková metoda má i své výhody, např. z hygienického hlediska je optimální, neboť při ní nedochází ke smíchávání s čerstvým substrátem. [1]

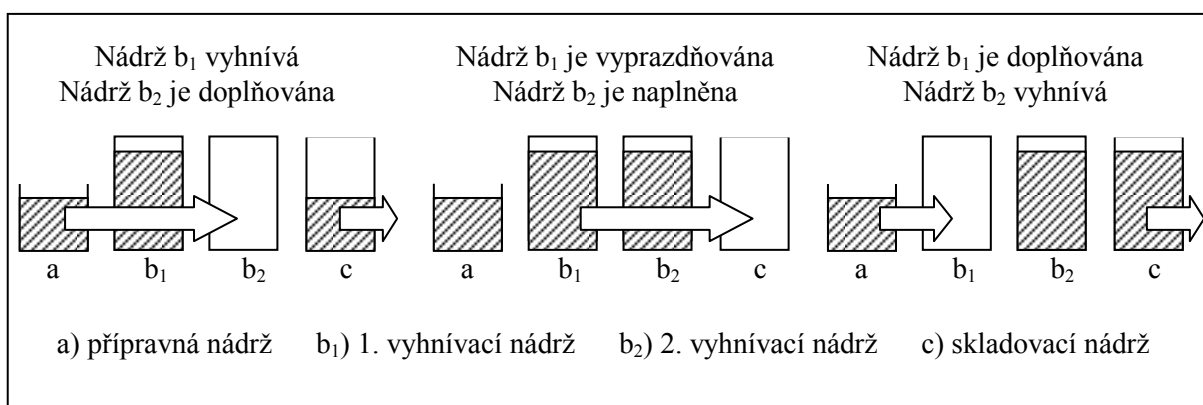


Obr. č. 3 - Princip dávkové metody

#### 4.1.2 Metoda střídání nádrží

Základem této metody jsou dvě vyhnivací nádrže, které se střídají v naplňování (viz obr. č. 4). Jedna vyhnivací nádrž je plná a probíhá v ní proces rozkladu. Mezi tím je z přípravné nádrže rovnoměrně plněna druhá vyhnivací nádrž. Jakmile je tato druhá vyhnivací nádrž naplněna, obsah první vyhnivací nádrže je přesunut do skladovací nádrže a poté začne být opět plněna z přípravné nádrže. Vyhnílý kal ze skladovací nádrže je průběžně zcela nebo částečně vyvážen pryč. Skladovací nádrž by měla být větší než vyhnivací nádrže, aby byla zachována případná rezerva.

Tato metoda se vyznačuje velmi rovnoměrnou výrobou plynu. Metoda střídání nádrží má dobrou i špatnou vlastnost jako dávková metoda. Nedochází zde ke smíchávání vyhnívaného substrátu s čerstvým, takže je metoda hygienicky dobrá. Nevýhodou jsou vyšší pořizovací náklady. [1]



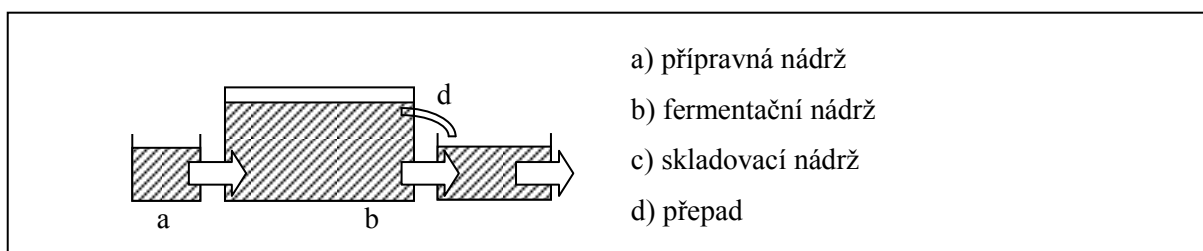
Obr. č. 4 - Princip metody střídání nádrží

#### 4.1.3 Průtoková metoda

Metoda je založena na stálém naplňování vyhnivací nádrže, kdy je nádrž průběžně doplňována z malé přípravné nádrže čerstvým substrátem a zároveň dochází k automatickému odchodu odpovídajícího množství vyhnílého substrátu přepadem do skladovací nádrže. K doplňování vyhnivací

nádrže dochází jednou až dvakrát denně. K úplnému vypuštění nádrže dochází jen v nutných případech (opravy, čištění usazenin). Metoda je naznačena na obrázku č. 5.

Výhodou je rovnoměrná produkce plynu a maximální využití vyhnívacího prostoru. Metoda je také poměrně cenově příznivá. Využívá se kompaktní konstrukce nádrže, která má nízké tepelné ztráty. Celý proces lze navíc výhodně zautomatizovat. Oproti tomu nevýhodou této metody je fakt, že vlivem promíchávání může dojít ke smíchání čerstvého substrátu a vyhnílého materiálu, takže tato metoda není zrovna z hygienického hlediska optimální. [1]

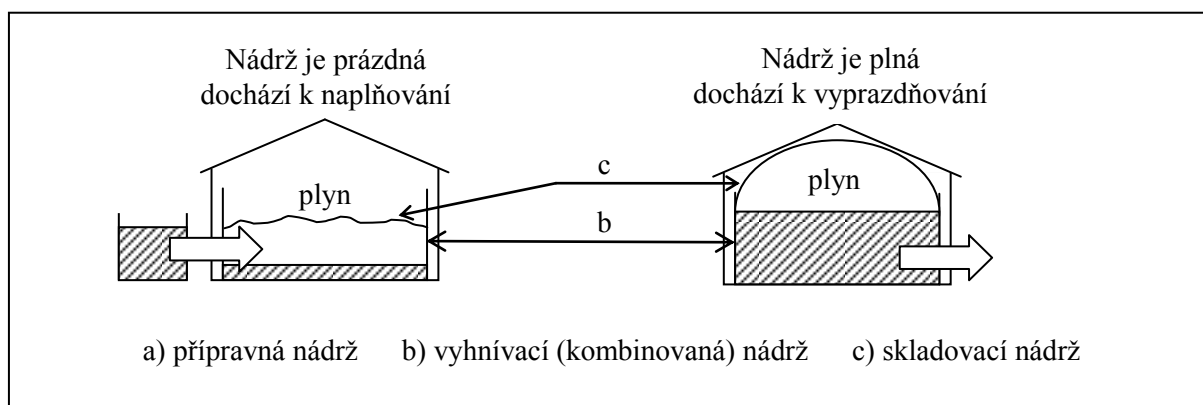


Obr. č. 5 - Princip průtokové metody

#### 4.1.4 Zásobníková metoda

Zásobníkovou metodou je rozuměno spojení fermentoru a skladovací nádrže do jedné nádrže (viz. obr. č. 6). Tato kombinovaná vyhnívací a skladovací nádrž se postupně plní z přípravné nádrže. Až je tato kombinovaná nádrž plná, tak se musí vyprázdnit, přičemž malý zbytek vyhnílého substrátu se v nádrži nechává, aby mohl být nový substrát „naočkován“ bakteriemi.

Tato metoda je jednoduchá, přehledná a levná, protože provozovateli stačí jedna velká nádrž. Výhodou je také jednoduchá a levná přestavba otevřené jímky na BPS. Produkce plynu však není rovnoměrná, odvíjí se od naplnění nádrže. [1]

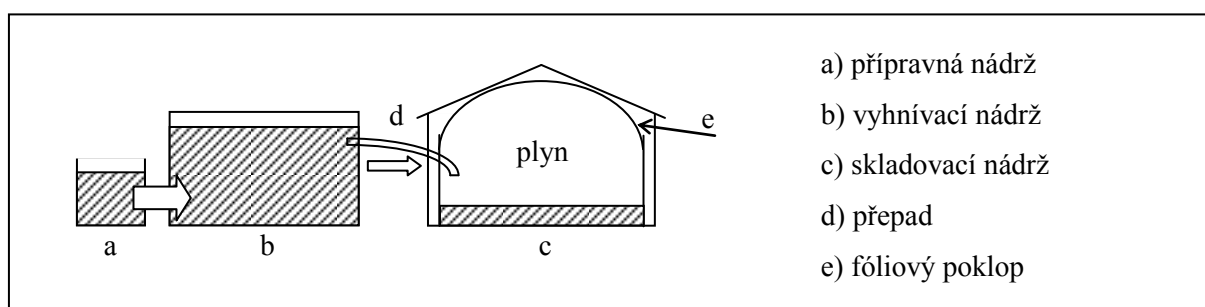


Obr. č. 6 - Princip zásobníkové metody

#### 4.1.5 Kombinovaná průtoková metoda se zásobníkem

Metoda, jak už je zjevné z jejího názvu, kombinuje metodu průtokovou, kde je fermentační nádrž stále plná, dochází k průběžnému plnění a odebrání nádrže a metodu zásobníkovou. Zásobníkem se stane skladovací nádrž, která se oproti předchozím metodám, kde byla odkrytá, zakryje

fóliovým nebo pevným poklopem s cílem získat bioplyn, který i z vyhnílého odpadu stále uniká. Vzhledem k tomu, že skladovací doba je okolo 7 měsíců, množství zachyceného bioplynu za tuto dobu je poměrně velké. Z celkového výnosu bioplynu z BPS pochází 20 až 40 % právě ze skladovací nádrže. Skladovací nádrž už zpravidla není tepelně izolována, vyhřívána či promíchávána, takže náklady na tento dodatečný zisk bioplynu jsou malé. Tato metoda, jež je naznačena na obrázku č. 7, představuje nejvyšší stupeň bioplynové technologie. [1]



Obr. č. 7 - Princip kombinované průtokové metody se zásobníkem

## 4.2 Počet procesních stupňů a procesní teplota

Nejčastěji se u zemědělských BPS využívají jednostupňové metody, kde všechny čtyři fáze rozkladu probíhají v jednom fermentoru. Při dvoustupňové či více stupňové metodě se fáze rozkladu oddělují do jednotlivých nádrží, např. u dvoufázové metody se hydrolýza a fáze okyselení provádí v jedné externí nádrži. [1]

BPS fungují na mezofilním principu při teplotě 32 až 38 °C nebo na termofilním principu při teplotě 42 až 45°C. Teplota fermentoru se optimalizuje podle substrátu. Valná většina BPS pracuje v mezofilní oblasti. Termofilní zařízení bývají kombinovaná s jedním mezofilním procesním stupněm.

## 4.3 Fermentace podle obsahu sušiny

Fermentace bývá dvojího druhu - mokrá a suchá. O který druh jde, je určeno konzistencí fermentovaného substrátu, přičemž jeho konzistence je dána obsahem sušiny. Při mokré fermentaci se používají tekuté i pevné substráty, ale výsledná reakční směs musí být tekutá. U suché fermentace se používají zásadně substráty pevné.

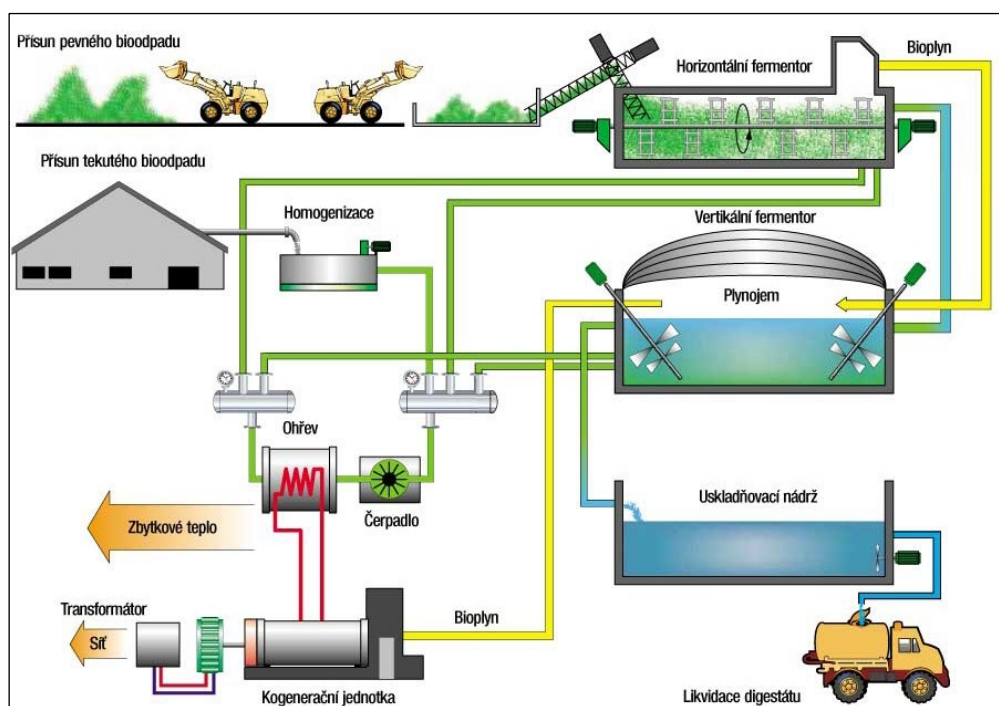
Jasně rozdělení mezi těmito dvěma metodami je z biologického hlediska zavádějící, protože bakterie podílející se na fermentovacím procesu pro své přežití vždy potřebují tekuté médium. CZ BIOM uvádí: „*Neexistuje žádná přesná definice hranice mezi mokrou a suchou fermentací avšak v praxi už se zdomácnělo, že do obsahu suché masy ve fermentoru od 12 - 15 % se hovoří o mokré fermentaci, neboť takový obsah biofermentoru je ještě pumpovatelný. Přestoupí-li obsah suché hmoty v biofermentoru 16 %, tak materiál už není zpravidla pumpovatelný a proces označujeme jako suché zfermentování.*“ [3]

#### 4.3.1 Metoda mokré fermentace

Reaktory uzpůsobené mokré fermentaci zpracovávají ve většině případů cíleně pěstovanou biomasu (siláže, senáže) v kombinaci se statkovými hnojivy, nicméně mohou zpracovávat širokou škálu i jiných biologicky rozložitelných materiálů (odpad z jídelen, bioodpad od obyvatel či z průmyslu, aj.). Fermentory mohou být ležaté, svislé nebo v kombinaci. Bývá v nich udržována konstantní teplota 35 °C při mezofilních podmínkách nebo kolem 55 °C při termofilních podmínkách. Termofilní proces se vyznačuje hlubším rozkladem organické hmoty, tím pádem vyšší produkcí bioplynu, avšak při nižší stabilitě procesu. [9]

Každá fermentační nádrž má s ohledem na spolehlivost provozu svůj vlastní plynojem. Přítok substrátu do fermentoru je prováděn kontinuálním dávkováním, které je řešeno silami s posuvnými podlahami nebo řezacími šneky pro lepší zpracování biomasy. V případě zpracovávání komunálního bioodpadu je vždy nutná předúprava třízením, aby byla zajištěna separace anorganických částí, a drcením. Míchání substrátů ve fermentorech zajišťují velkokapacitní pádlová míchadla umožňující zpracování vysokých podílů vysokosušinových materiálů. Doby zdržení substrátu ve fermentorech bývají alespoň 50 dní. [10]

Na obrázku č. 8 je graficky znázorněna celá metoda mokré fermentace. Lze zde mimo jiné vidět homogenizaci tekutého substrátu, aby měl v celém objemu stejné vlastnosti, či realizaci jeho ohřevu přes tepelný výměník.



Obr. č. 8 - Zjednodušené schéma BPS s mokrou fermentací

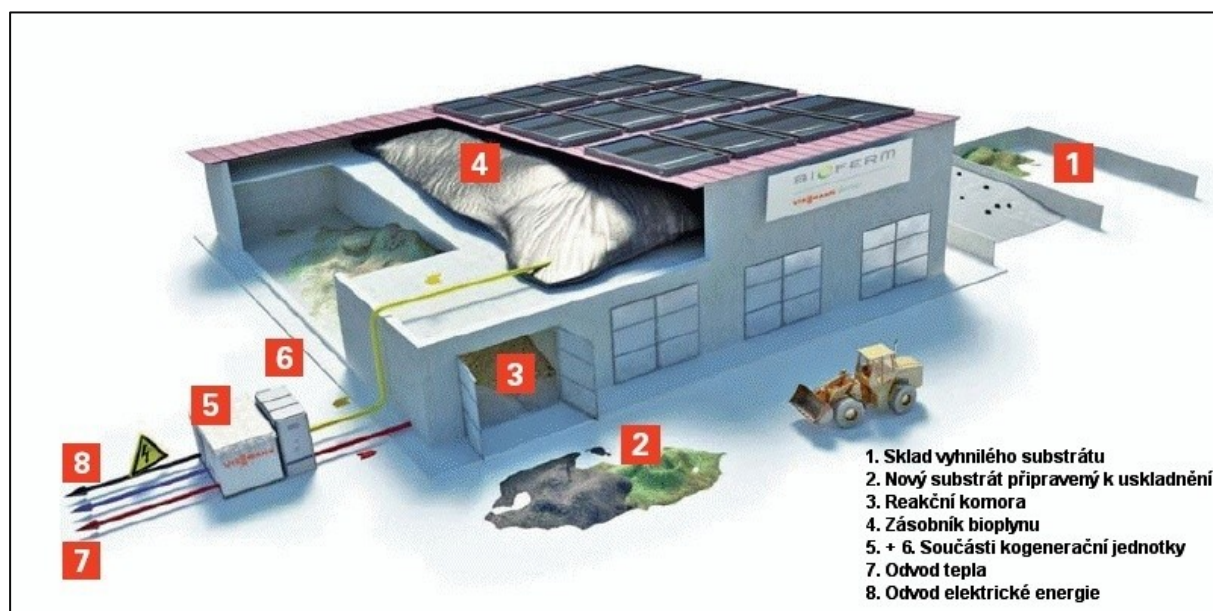


#### 4.3.2 Metoda suché fermentace

Metoda suché fermentace je oproti mokré fermentaci podstatně energeticky nenáročnější na provoz a méně citlivá na kvalitu vstupního substrátu. Tyto dvě pozitivní vlastnosti zapříčinily počátek a rozvoj této technologie. Děje se tak zejména v západní Evropě, přičemž jde o záležitost posledních let, takže počet BPS pracujících na metodě suché fermentace je prozatím pouze v řádech pár desítek. Na obrázku č. 9 je naznačena realizace této metody.

Vstupní substrát je pevný, neředěný a s pracovní sušinou pohybující se v množství kolem 30 %. Suchá fermentace u tzv. garážových BPS využívá diskontinuálního procesu, kdy je materiál nadávkován do paralelních fermentačních železobetonových komor, následně je uzavřen plynotěsnými vraty a zahříván na provozní teplotu (obvykle cca 40 °C) za současného zkrápění tzv. perkolátem, což je látka s obsahem vhodných kultur anaerobních mikororganismů pocházející z výluhu z komor. Ve velmi krátké době dojde ke spotřebování kyslíku, čímž se odstartuje anaerobní fermentace a tvorba bioplynu. Substrát setrvává v komoře 20-40 dní, po té již produkce bioplynu klesá. Vyhnílý substrát je následně vyskladněn a obvykle dekompostován. Část vyhnílého substrátu se může vracet pro naočkování nového substrátu bakteriemi. Takových komor je obvykle vedle sebe několik, čímž se vyrovná nerovnoměrná produkce bioplynu jednotlivých komor. [9]

Existuje i kontinuální technologie, kdy je reakční objem rozdělen na několik fermentorů s jedním pomaloběžným míchacím zařízením. Tato technologie doprovázena vysokou investiční a provozní náročností. Nejčastěji je kontinuální metoda využita pro zpracování komunálních a tříděných domovních odpadů. [11]



Obr. č. 9 - BPS se suchou fermentací (diskontinuální technologie)

## 5 Pojem kogenerace a kogenerační jednotka

### 5.1 Definice kombinované výroby

Kombinovanou výrobou energií se nazývá postupná nebo současná produkce alespoň dvou koncových forem energií z formy primární, tedy z paliva. Koncové formy energií mají nejčastěji podobu energie elektrické a tepelné, přičemž takováto výroba se nazývá kombinovaná výroba elektrické a tepelné energie neboli kogenerace. V případě, kdy je část tepla využívána pro odnímání tepla jinému médiu (chlazení), hovoříme o trigeneraci. Tento termín tedy zahrnuje třetí druh dodávané energie - chlad. S ohledem na termodynamické zákony je však toto označení chybné, poněvadž chlad transformací energie nelze získávat. Označení se používá zejména pro vhodný popis z obchodního a bilančního hlediska. Trigeneraci se tato práce nebude dále zabývat.

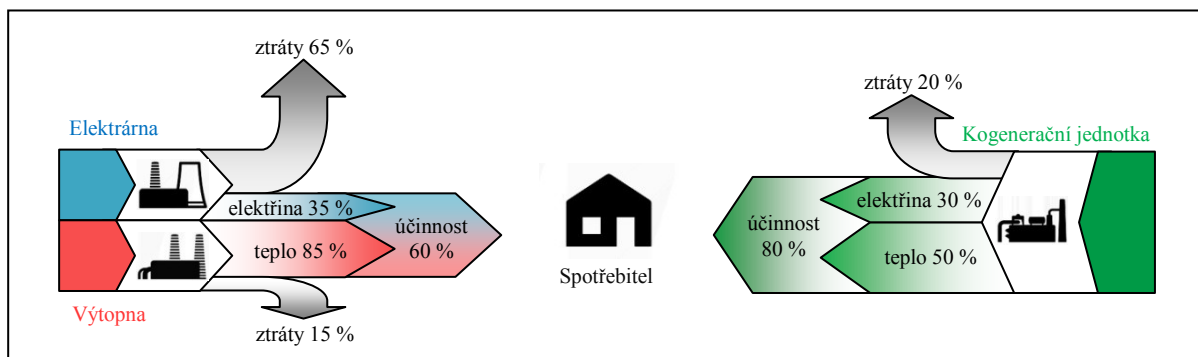
Výroba elektrické a tepelné energie probíhá v energetických výrobnách, které nazýváme teplárenské jednotky nebo kogenerační jednotky. Výroba může probíhat v jednom nebo ve dvou transformačních řetězcích. Rozdíl je v tom, že v případě dvou transformačních řetězců je elektrická energie generována dvěma generátory na dvou různých místech. Typickým představitelem je spalovací turbína. Spalování plynu je využito pro pohon turbíny, která žene první generátor, zatímco její horké výstupní spaliny lze prostřednictvím parního oběhu využít k pohonu druhého generátoru. Většina kogeneračních jednotek však tuto možnost nemá, poněvadž jejich výstupní teplo nemá takový potenciál, aby mohlo zajistit chod druhého generátoru. Proto o nich tvrdíme, že využívají jednoho transformačního řetězce. [4]

### 5.2 Výhody kombinované výroby energií

Kombinovaná výroba elektrické a tepelné energie je velice příznivá z ekonomického i ekologického hlediska. Uvolněná energie paliva je u energetických zařízení pracujících v kogeneraci lépe využita. Hospodárnější provoz se projeví na úspoře paliva, neboť při stejném podávaném výkonu je ho zapotřebí méně. Nižší spotřeba paliva má vliv na úsporu financí vynaložených na jeho nákup. V neposlední řadě je nutné si uvědomit, že čím méně paliva kogenerační jednotka spálí, tím méně škodlivých emisí vypustí do ovzduší, což je v dnešní době vítané.

Navýšení účinnosti kogenerační výroby je názorné na příkladu na obrázku č. 10. Elektrárna má poměrně nízkou účinnost, pouze 35 % uvolněné energie ze spáleného paliva se transformuje na elektrickou energii, zbytek je mařen v chladicích věžích. Výtopna má naopak vysokou účinnost, v dodávku tepla je přeměněno 85 % vstupní energie. Chceme-li zjistit celkovou dodanou energii spotřebiteli, uvažujeme podíl součtu účinností elektrárny a výtopny k celkovému množství spáleného paliva v elektrárně i výtopně. Neuvažujeme-li ztráty vedením elektřiny a tepla, spotřebiteli je dodáno 60 % celkové vstupní energie. Naproti tomu u kombinované výroby není vznikající teplo při výrobě elektřiny mařeno, ale je efektivně odváděno pro další využití. V případě kogeneračních jednotek v zemědělství je teplo využito například pro přípravu teplé vody, vyhřívání zemědělských budov

či fermentoru a v případě velkých tepláren je spotřebiteli možné dodávat přímo horkou páru. Účinnost kombinované výroby oproti oddělené výrobě elektřiny a tepla vzrostla z 60 % na 80 %, přičemž v praxi může být až 90 %. [4]



Obr. č. 10 - Porovnání oddělené a kombinované výroby elektrické energie a tepla

### 5.3 Zařízení kogenerační jednotky

Každá kogenerační jednotka je složena z několika energetických zařízení, které dohromady utváří funkční celek, jenž umožňuje z paliva získat elektrickou a tepelnou energii. Možností technologického postupu této přeměny je hned několik. Některé technologie jsou využívány již dlouhou dobu, některé jsou poměrně nové a jejich širší uplatnění závisí na dalším výzkumu. Principiálně však všechny technologie přeměny energie mají čtyři základní části:

**Zařízení pro úpravu primárního zdroje energie** – vhodným způsobem upravuje parametry vstupní formy energie, se kterými následně pracuje primární jednotka. Mohou být vylepšeny podmínky pro lepší uvolnění energie z plynu (úprava tlaku a teploty). Možností je také plyn zušlechtit, aby se navýšila energie obsažená v jeho objemové jednotce, nebo odstranit z něj případné nežádoucí příměsi. Zda-li jsou tyto úpravy plynu nutné, závisí na jeho kvalitě. Pokud je do kogenerační jednotky přiváděn v dostatečné kvalitě, není těchto zařízení potřeba.

**Primární jednotky** – jedná se o hlavní část, která zásadně ovlivňuje možnosti použití dané kogenerační jednotky. Primární jednotka zabezpečuje přeměnu energie paliva na ušlechtlejší mechanickou (tepelný motor) nebo elektrickou (palivové články) energii.

**Zařízení pro výrobu a úprava elektrické energie** – tato část je tvořena elektrickým generátorem a případně také elektrickým kondicionérem. Elektrický generátor přeměňuje mechanickou energii motoru na výstupní elektrickou energii. Generátor je hřídelí spojen s tepelným motorem, takže i on je de facto součástí primární jednotky. Kogenerační jednotka může být vybavena i kondicionérem, který umožňuje změnu frekvence proudu nebo popřípadě transformaci mezi stejnosměrným a střídavým proudem. To by bylo nutné, kdyby byl použit stejnosměrný generátor.

**Zařízení pro rekuperaci tepelné energie** – transformuje odváděný tepelný výkon motoru na požadovanou formu o určitých parametrech. Může se jednat o nízkoteplotní nebo vysokoteplotní vodu, vodní páru či teplý vzduch. [4]

## 6 Primární jednotky bioplynového kogeneračního soustrojí

Primární jednotky jsou nejdůležitější částí všech kogeneračních jednotek. Probíhá v nich transformace energie z přivedeného paliva na energii elektrickou. Existuje mnoho technologií, jak této transformace dosáhnout. Zvláštním případem jsou palivové články, které nemají žádné mechanické pohyblivé součásti. Ostatní technologie oproti palivovým článkům pohyblivé části mají a elektrickou energii z chemické získávají vždy prostřednictvím energie mechanické. Je tedy zřejmé, že jejich nezbytnou součástí jsou elektrické generátory, které tuto transformaci umožňují. Jednotlivé typy kogeneračních jednotek založené na principu nepřímé přeměny energie se liší zejména elektrickým a tepelným výkonem, účinností, nutnými investicemi a náročností na obsluhu a údržbu. Na základě těchto rozdílů všechny typy kogeneračních jednotek nachází své místo využití. Nejvyšších výkonů dosahují parní a spalovací turbíny. Menších výkonů pak dosahují velice oblíbené spalovací motory, které budou v rámci této práce ze všech typů jednotek rozepsány nejvíce, poněvadž právě jimi vybavené kogenerační jednotky jsou velice rozšířené u provozovatelů BPS, používající jako palivo bioplyn. Dále je nutno neopomenout Stirlingovy motory, rozvojové mikroturbíny či nejčistší zdroje energie, již zmiňované, palivové články. [12]

### 6.1 Parní turbíny

Parní turbíny jsou známy a průmyslově využívány již dlouhou dobu. Princip spočívá v uvolňování tepelné energie spalováním paliva ve spalovací komoře generátoru, přičemž vzniklá energie je předávána vodě o vysokém tlaku, čímž dochází v parním generátoru ke změně skupenství vody na páru. Vytvořená pára expanduje v parní turbíně a dochází k výrobě mechanické práce v podobě točivého momentu na hřídeli.

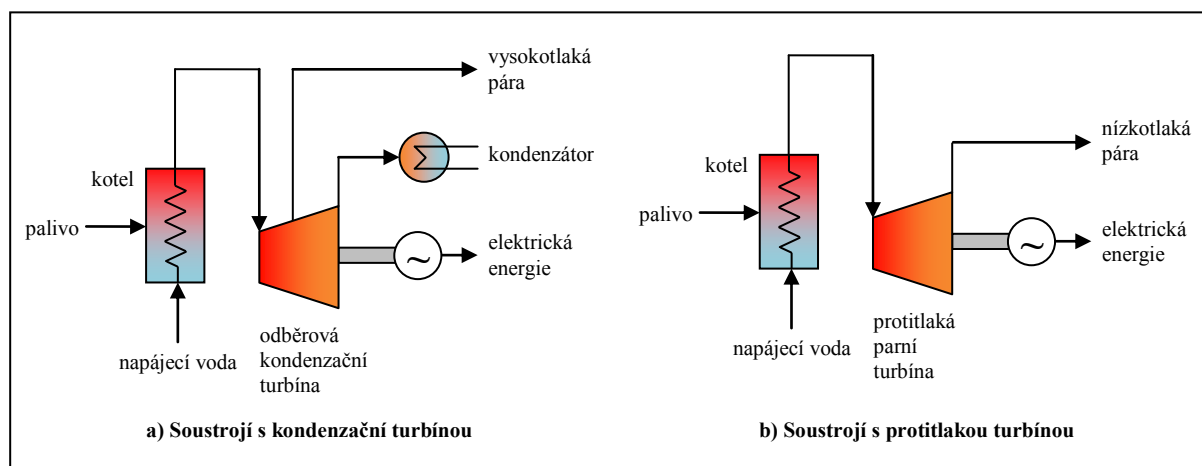
Výstupní pára vstupuje buď do kondenzátoru, anebo do tepelného výměníku. S ohledem na místo odběru tepelné energie pro dodávku tepla a množství páry podílející se na výrobě elektrické energie a tepla se systémy s parními turbínami rozlišují na protitlaké a kondenzační. Soustrojí s oběma typy turbín jsou naznačeny na obrázku č. 11.

- **Protitlaká turbína** – využívá se tam, kde je prioritou dodávka tepla. Pro kvalitní dodávku tepla je důležité, aby výstupní pára měla co možná nejvyšší teplotu. Tato skutečnost je ale v rozporu s účinnou výrobou elektrické energie. Její výroba je u protitlakých turbín až druhořadá, proto dosahuje jen nízkých hodnot.
- **Kondenzační turbína** – má opačnou prioritu než protitlaká turbína, a sice výrobu elektrické energie. Kondenzátor ochlazuje výstupní pracovní látku tepelného oběhu z turbíny na teplotu okolí, čímž klesá její tlak. Tím je dosažena maximalizace zisku elektrické energie. Odváděné teplo má ale tak nízkou teplotu, že se nedá nijak využít.

Parní turbíny mají široké rozmezí používaných elektrických výkonů, počínaje jednotkami a konče několika stovkami MW. Hodnoty tepelných výkonů jsou oproti elektrickým ještě mnohem

vyšší, proto je poměr elektrické a tepelné energie nízký, a sice v rozmezí 0,05 - 0,2. Z tohoto důvodu je parní turbína vhodná zejména tam, kde jsou vysoké tepelné odběry např. teplárny.

Účinnosti elektrické výroby se pohybují od 8 % u malých protitlakových turbín až do 35 % u velkých kondenzačních turbín. Výhodou parních turbín jsou nízké provozní náklady, jedna kWh vyrobené elektrické energie si vyžaduje náklady ve výši asi 0,1 Kč. Parní turbíny se pak dále vyznačují dlouhou životností, při správném provozu a údržbě se někdy provozují až 50 let. Nevýhodou je omezená regulace výkonu a dlouhá doba nájíždění turbíny, což je způsobeno nutností prohřívání. Vysoká cena parní turbíny předurčuje její využití jen na dlouhodobý chod při velkých výkonech. [4]



Obr. č. 11 - Schéma parních turbín

## 6.2 Plynové turbíny

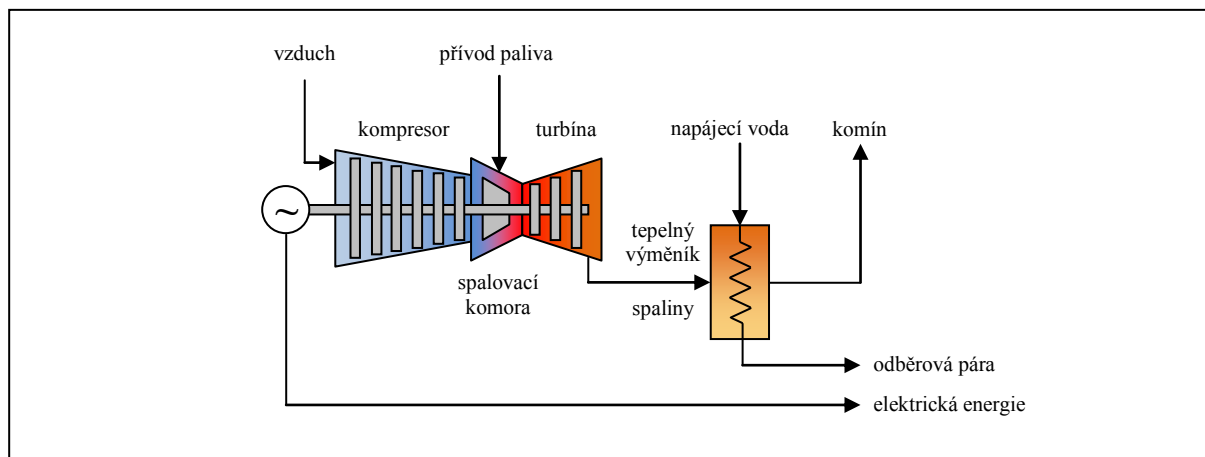
Plynová (spalovací) turbína je druh tepelného motoru, který transformuje tepelnou energii spalovaného plynu na mechanickou práci. Označení motoru vychází z jedné jeho součásti - plynové turbíny, mimo ní jsou dalšími důležitými součástmi spalovací komora a kompresor.

Nasátý vzduch je kompresorem stlačován na potřebný tlak, pod kterým je vháněn do spalovací komory, kde mu je dodána tepelná energie ze spalovaného paliva. Stlačená směsice horkého vzduchu a spalín proudí ze spalovací komory do turbíny, kde dochází k tlakové expanzi, čímž se turbína roztáčí. Vyrobená mechanická práce je využita pro chod kompresoru, který je umístěn na stejné hřídeli, a k pohonu elektrického generátoru. Jednotkový elektrický výkon u plynových turbín se většinou pohybuje v rozmezí od 500 kW do 250 MW.

Pro plynové turbíny lze v podstatě použít jakékoliv kapalné či plynné palivo. Spaliny vstupující do turbíny musí být ale čisté, aby nepoškodily lopatky turbíny. Výstupní teplota spalín je vysoká (450–500 °C), což je výhodné pro další využití, jako je příprava velmi horké vody nebo výroba páry pro vytápění či pro parní turbínu. Schéma plynové turbíny je naznačeno na obrázku č. 12.

Moderní plynové turbíny jsou vysoce spolehlivé a dosahují celkové účinnosti 60–80 %. Při jmenovitých hodnotách umožňují nepřetržitý provoz až jeden rok. Jsou však silně závislé na teplotě a tlaku okolí, proto je potřeba počítat s tím, že změnou nadmořské výšky o 300 metrů

dochází k poklesu elektrického výkonu o 2 - 4 %. Dále je nutné kvůli velké míře hlučnosti provozu plynové turbíny uvažovat nad přiměřeným protihlukovým opatřením.[4]



Obr. č. 12 - Plynová spalovací turbína

### 6.2.1 Mikroturbíny

Mikroturbíny reprezentují zcela nový druh spalovacích turbín. Pracují při menších výkonech než běžné spalovací turbíny a jsou typické svým vysokootáčkovým provozem. Vysokým otáčkám (až 120 000 ot/min) musí být uzpůsobena konstrukce turbíny. Pro nalezení vhodných materiálů je dlouhodobě veden výzkum. Nyní se konstruktéři snaží najít lepší materiál na lopatky turbíny, které jsou tepelně velmi namáhané. Novinkou oproti klasickým turbínám je využití vzduchových ložisek, což je důsledek vysokootáčkového provozu. Vzduchové ložiska však nepotřebují mazací olej, tudíž odpadá olejové hospodářství turbíny. Nezbytnou součástí jednotky je patřičné zařízení pro úpravu elektrické energie, protože elektrický proud generován vysokootáčkovým generátorem nesplňuje průmyslové podmínky, zejména pak kmitočet. Elektrické výkony mikroturbín bývají v rozsahu od 30 do 350 kW. Jejich elektrická účinnost je 20 až 30 % a celková účinnost kogenerační jednotky při využití tepla může být 60 až 80 %. Výhodou mikroturbín jsou malé rozměry, mobilita a v porovnání s klasickými spalovacími turbínami nižší hlučnost. Mohou být často využívány jako záložní zdroje. Standardním palivem bývá zemní plyn, který však může být snadno nahrazen bioplynem. [13]

### 6.3 Spalovací motory

Užití plynových spalovacích motorů v kogeneraci je dnes velmi rozšířené. Používají se tam, kde není zapotřebí značných elektrických výkonů, tedy v rozmezí od několika desítek kW až po jednotky MW. Plynové spalovací motory konstrukčně vychází z dnes zcela běžných, sériově vyráběných zážehových a vznětových motorů, které se musí na provoz na plyn předem připravit. Jako palivo se po úpravě motoru dá používat zemní plyn, důlní plyn a také bioplyn, který nachází své uplatnění především v BPS, kde se nejčastěji používají motory o výkonu 250 až 1000 kW. [12]

### 6.3.1 Princip spalovacího motoru

Pístové spalovací motory jsou dnes velmi známé zejména z dopravy. Během desetiletí používání prošly velkým vývojem, který byl zapříčiněn zejména neustálým navyšováním ekonomických a ekologických požadavků. Základem je píst, který je cyklickým spalováním paliva uváděn do přímočarého pohybu. Pro docílení kruhového pohybu je píst spojen s klikovou hřídelí. Motor obsahuje několik pístů (4,6, 8,12,16, aj.), přičemž každý je umístěn ve svém vlastním válci. Větší počet válců a jejich uspořádání má pozitivní vliv na zrovnoměnění průběhu točivého momentu na hřídeli. [4]

### 6.3.2 Spalovací motory na bioplyn

Jak již bylo uvedeno, plynové spalovací motory vychází z motorů na kapalná paliva. Tyto motory je nutné pro provoz na bioplyn upravit. Míra nutných úprav závisí na typu představovaného motoru. Pokud se jedná o motor zážehový (benzínový), přestavba spočívá ve výměně karburátoru za směšovací zařízení, v němž se vytváří předepsané směs vzduchu a plynu. Upravené zážehové motory se zpravidla používají na nejnižší výkony, řádově desítky kW. Spojková účinnost takovýchto motorů bývá pod 30 %. Pokud je takový výkon nedostačující, začíná se od zážehových motorů upouštět a zvažuje se přestavba motoru vznětového (naftového).

Vznětový motor je možno na bioplynový provoz upravit dvěma způsoby:

- Zážehový provoz – jedná se o starší a několika desetiletími osvědčený způsob provozu. Vstřikovací jednotka je nahrazena zařízením pro zážeh z cizího zdroje a směšovačem plynu. Motory bývají těžké a robustní, osvědčily se zejména na skládkách při spalování skládkového plynu. Pro zemědělské stanice jsou však většinou příliš velké a drahé.
- Provoz se zapalovacím vstřikem – tento způsob provozu je specifický tím, že mimo bioplynu je nutné ještě jedno palivo – zapalovací olej. Bioplyn by se kvůli své velmi nízké zápalnosti pouhým stlačením ve válci nevznítil. Proto se využívá principu, kdy je do válce nasána směs vzduchu a bioplynu, která je pístem stlačena, čímž dojde k ohřátí směsi, a při vstřiknutí zápalného oleje do válce dojde ke vznícení celé směsi. Změna výkonu pak není regulována množstvím vstřikovaného oleje, ale množstvím bioplynu nasátého do válce. Přestavba z naftového motoru spočívá pouze v instalaci přídavného směšovače plynu. [1]

Vznětové motory upravené na bioplynový provoz se používají v oblasti středních výkonů, a sice do několika stovek kW. Přestavovány bývají automobilové a traktorové motory, které díky vysoké kompresi mají dobrou účinnost. Spojková účinnost se obvykle pohybuje v rozmezí 32 až 35 %.

Motory velkých výkonů (stovky až tisíce kW) již představují složitá soustrojí, které jsou náročné na prostor, údržbu a obsluhu. Tyto motory však také vycházejí z konstrukce motorů na kapalná paliva. Předlohou se jim staly úspěšné a dlouhodobě používané trakční a lodní motory. [5]

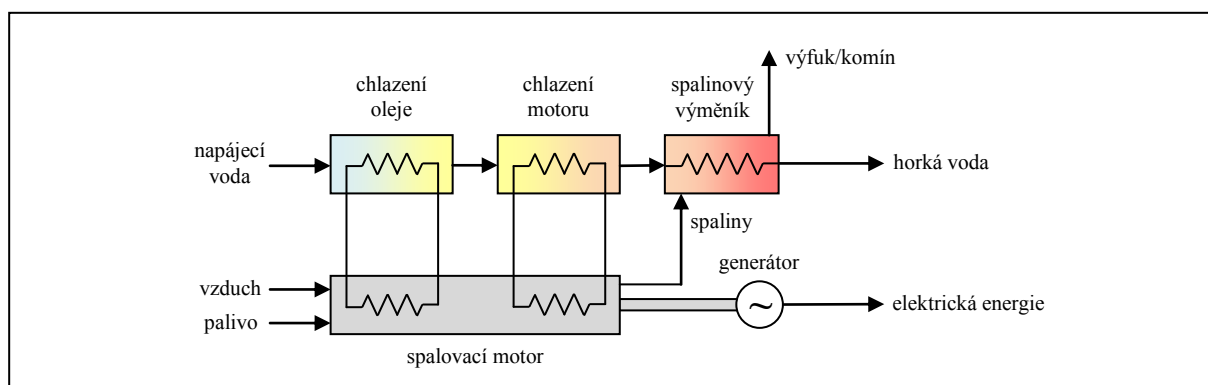
### 6.3.3 Způsoby využití odpadního tepla

Motor transformuje chemickou energii paliva na mechanickou energii na hřídeli. Žádný motor nemá stoprocentní účinnost, čili dochází ke ztrátám, které nabývají podoby odpadního tepla. V rámci kogenerace uvažujeme o využití tohoto tepla pro další účely. U spalovacího motoru existují principiálně čtyři místa, odkud lze teplo odebírat – z výfukových spalin, z chladicí vody motoru, mazacího oleje motoru a z chlazení kompresoru spalovacího motoru.

Součástí kogenerační jednotky je tepelný výměník, ve kterém je možné ohřát vodu horkými spalinami, jejichž teplota činí 400 až 650 °C. Na jakou hodnotu se může voda ohřát je otázka tlaku vody v okruhu, literatura uvádí od 110 do 180 °C, přičemž přesná hodnota závisí na velikosti a výkonu celé kogenerační jednotky. Dále je možné odebírat teplo z nezbytného chlazení motoru. Motor je chlazen chladicí kapalinou (vodou), která se pohybuje v teplotním rozmezí 90 až 100 °C. Regenerace tepla (viz obr. č. 13) se provádí kaskádovitě od nejnižších hodnot k nejvyšším a z celkového odváděného tepla je možné regenerovat 70–80 %.

Spalovací motory jako tepelný zdroj mohou být například využity pro:

- ohřev primární vody na 110–130 °C
- výrobu páry o nižším tlaku
- kombinaci přímého sušení výfukovými spalinami a ohřev vody teplem motoru
- předehřev napájecí vody a zároveň oksylovacího média hořáků parních kotlů
- vytápění budov a objektů
- chladicí zařízení [5]



Obr. č. 13 - Regenerace tepla spalovacího motoru

### 6.3.4 Spolehlivost spalovacích motorů

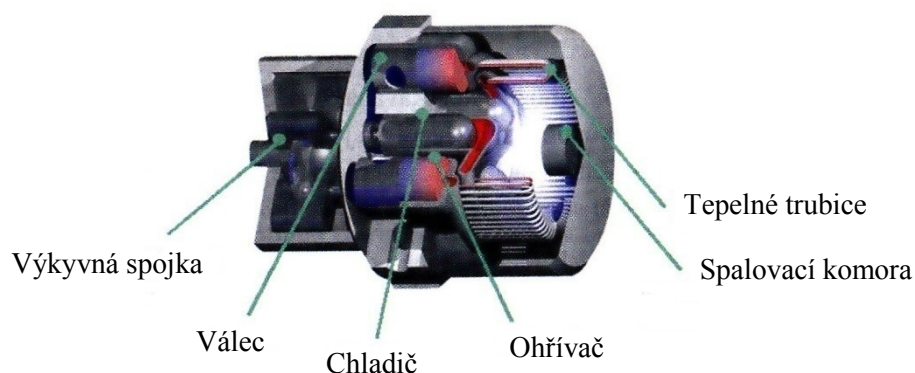
Moderní spalovací motory jsou spolehlivé, ale je to podmíněno pravidelnými kontrolami a opravami. Prodlevy mezi opravami jsou kratší, poněvadž spalovací motory mají mnoho třecích ploch. Pravidelné a časté kontroly zahrnují výměnu oleje, filtrů a chladicí kapaliny, méně časté pak výměnu hlav válců nebo turbokompresoru. Generální oprava je nutná po několika desítkách tisíc hodin provozu a v rámci ní se provádí výměna pístů, kontrola hřídele a ložisek. Pokud se jedná o vysokootáčkový motor, kontroly je nutné provádět častěji. [4]



## 6.4 Stirlingův motor

Stirlingův motor je tepelný motor, který pracuje na principu cyklické komprese a expanze pracovního plynu. Je složen ze dvou válců, které jsou hermeticky spojeny a jsou naplněny pracovní látkou, což nejčastěji bývá helium, vzduch, dusík nebo oxid uhličitý. Jeden válec je zahříván a druhý je ochlazován (viz obr. č. 14). Písty válců se dostávají do pohybu, jakmile plyn začne být v teplé části ohříván, čímž dojde k jeho roztahování, a následně je v chladné části ochlazován, čímž ztrácí objem a je pístem opět stlačen. Plyn se tak střídavě přesouvá z válce do válce a předává mechanickou energii pístům, které pomocí klikového mechanismu roztácejí hřídel. Motor může mít i jiné konstrukční uspořádání, a sice dva písty v jednom válci. Jeden píst je pracovní a druhý je nazýván jako přeháněč. Pracovní píst získává mechanickou energii ze změn objemu plynu a přeháněč, pomáhá při přemísťování plynu z teplé oblasti do studené a naopak. Přeháněč musí mít kolem stěn vůli, aby se plyn mohl přemísťovat. Oba písty jsou spojeny na setrvačnick kvůli zajištění plynulého chodu. Konstrukteři se snaží vymýšlet i další uspořádání, aby motor byl co nejefektivnější.

Teplo nutné pro chod motoru může být zajištěno mnohým způsobem, jako je spalování, sluneční ohřev či využití odpadního tepla z jiných technologických procesů. Motory mají nízkou hlučnost, proto není třeba velkých úprav a lze je umístit blízko spotřeby. Kogenerační jednotky se Stirlingovým motorem bývají elektrického výkonu do 600 kW, avšak pro spalování biomasy se začínají využívat i jednotky o elektrickém výkonu až 1,5 MW. Elektrická účinnost bývá okolo 30 %. Stirlingovy motory ale nejsou vhodné jako záložní zdroje, protože mají kvůli nutnému prostupu tepla delší dobu náběhu. [4]



Obr. č. 14 - Řez Stirlingovým motorem

## 6.5 Elektrické generátory

K výrobě elektrického proudu z točivého mechanického momentu se využívají asynchronní nebo synchronní generátory, přičemž kogenerační jednotky s asynchronním generátorem jsou u provozovatelů BPS k vidění častěji. Rozdíl mezi oběma typy generátorů je v jejich konstrukci. Asynchronní generátor nepotřebuje žádný budicí systém. Nutná magnetizace stroje je zajištěna odběrem jalového proudu ze sítě. Asynchronní generátor proto pracuje paralelně s nadřazenou elektrickou soustavou a není schopen pracovat po jejím výpadku, čili v případě jeho použití

nemůžeme uvažovat o možnosti jeho funkce jakožto záložního zdroje. Asynchronní generátor je konstrukčně shodný s třífázovým motorem s kotvou nakrátko, který se do generátorického režimu uvádí navýšením otáček nad jeho otáčky synchronní. Díky jeho jednoduchosti je často vyhledáván zejména u kogeneračních jednotek s nízkým výkonem.

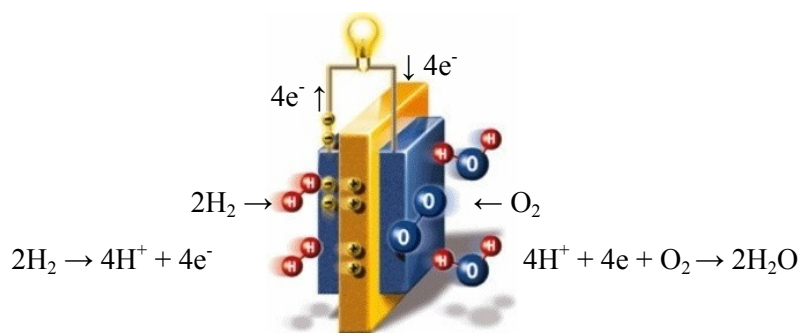
Synchronní generátory jsou oproti těm asynchronním složitější stroje, které vyžadují budicí systém. Tento na síti nezávislý systém buzení umožňuje generátoru pracovat v ostrovním režimu, takže oproti asynchronnímu generátoru má značnou výhodu, že kogenerační jednotka jím vybavená může být použita jako záložní zdroj elektrické energie. Pokud chceme synchronní generátor připojit na síť, je k tomu nezbytně nutné synchronizační zařízení, které generátor se sítí spojí jen při shodném průběhu jejich napětí. Kdyby synchronní generátor byl k síti připojen v nesynchronizovaném stavu, mohlo by to mít fatální následky. Synchronizační a budicí zařízení synchronní generátor značně prodražují. Proto se synchronní generátory zpravidla využívají u kogeneračních jednotek o vyšším výkonu. Zatímco u kogeneračních jednotek o elektrickém výkonu okolo 100 kW se používají levnější asynchronní generátory, u výkonů vyšších než 400 kW jsou téměř výhradně používány generátory synchronní. [5]

## 6.6 Palivové články

Palivové články pracují s přímou transformací chemické energie na energii elektrickou. Oproti způsobu nepřímé transformace (tepelné motory) je tak vypuštěna podoba mechanické energie, která byla potřebná pro chod generátorů.

Palivový článek je složen ze dvou elektrod, a sice anody a katody. Obě elektrody jsou pro navýšení účinnosti pokryty katalyzátorem, což může být platina nebo palladium. Elektrody jsou od sebe odděleny elektrolytem. Jako elektrolyt může sloužit kyselinka fosforečná nebo hydroxid draselný. Zdrojem energie je vodík, který je přiveden na anodu. Na katodu je přiveden kyslík, který je získáván z okolního vzduchu a jedná se o tzv. oxidační činidlo. Vodík s kyslíkem může exotermním procesem vyrábět elektrickou energii prostřednictvím elektrolytu za vzniku vody či páry.

Na anodě dochází ke štěpení vodíku na protony a elektrony. Protony prochází skrze elektrolyt ke katodě, kde reagují s atomy kyslíku na vodní páru. Uvolněné elektrony se ke katodě pohybují vnějším uzavřeným obvodem jako elektrický proud (viz obr. č. 15). [5]



Obr. č. 15 - Kyslíko-vodíkový palivový článek

Ideálním palivem pro palivové články je čistý vodík. Musíme si ale uvědomit, že vodík není běžně dostupné komerční palivo. Vodík je tedy nutné získat z jiného běžně dostupného paliva. Nabízí se možnost získávat vodík elektrolýzou z vody, to je však finančně nákladný proces, takže celková účinnost by klesla pod příznivou hodnotu. Zdrojem vodíku se mohou stát plyny jako je zemní plyn, bioplyn aj., neboť tyto plyny jsou z velké míry tvořeny metanem  $\text{CH}_4$ , ze kterého vodík lze získat. Součástí kogenerační jednotky s palivovým článkem je tedy tzv. palivový procesor neboli reformátor, což je zařízení, které několika možnými postupy provádí přeměnu vstupního paliva na palivo vodíkové. Pak již kogenerační jednotka získává stejnosměrný proud podle předešlého popisu. Stejnosměrný proud je nutné převést na proud střídavý, proto je jednotka vybavena střídačem.

Kyslíko-vodíkové palivové články lze rozdělit podle druhu elektrolytu a pracovní teploty do pěti skupin, z nichž nejrozvinutější jsou palivové články PAFC, kde má elektrolyt podobu kyseliny fosforečné a pracovní teplota je  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Elektrický výkon jednoho palivového článku se pohybuje v rozmezí 2–100 kW, přičemž kogenerační jednotka bývá složena hned z několika palivových článků, takže její výsledný elektrický výkon může být až 2 MW. Kogenerační jednotka s palivovými články disponuje vysokou spolehlivostí (zejména díky absenci pohyblivých částí), dobré účinnosti při sníženém výkonu a malou závislostí výkonu na okolních podmínkách. Jedná se o tichý a čistý zdroj energie, který je stále v intenzivním výzkumu.[4]

## 6.7 Srovnání primárních jednotek

Tab. č. 8 - Vybrané výhody/nevýhody u jednotlivých typů primárních jednotek

Typ PJ	Výhody	Nevýhody
Parní turbíny	Vysoká účinnost, možnosti použití všech druhů paliv, velké výkonové rozpětí, dlouhá životnost	Vysoké náklady, pomalý start, nízký teplotní modul
Plynové turbíny	Vysoká spolehlivost umožňující, relativně nízké investiční náklady, velký rozsah možných paliv a možnost jejich kombinace	Níže mechanická účinnost oproti spalovacím motorům, vysoký hluk, požadavky na suché a čisté palivo, delší doba náběhu
Mikroturbíny	Vysoká spolehlivost, jednoduchá instalace, levná údržba, malé rozměry a hmotnost, přijatelná hladina hluku	Vysoké prvotní náklady
Spalovací motory	Vysoká účinnost v širokém rozmezí otáček, nízké investiční náklady, možnost použití v ostrovním režimu, rychlý start, snadná údržba	Nutnost chlazení i když se nevyužívá teplo, vysoké náklady na údržbu, velké hodnoty nízkofrekvenčního hluku
Stirlingovy motory	Elektrická energie není závislá na výrobě tepla, nízké emise, jednoduché řízení	Zatím poměrně nákladné, při použití v menších výkonech nejsou ozkoušené
Palivové články	Nízké emise a hluk, vysoká účinnost v celém pásmu zatížení, krátká doba výstavby, flexibilita	Náklady, nízká doba životnosti, malá hustota energie, dlouhá startovací doba, požadavky na čistý vodík

## 7 Analýza výroby elektrické energie v konkrétní bioplynové stanici

V této kapitole se zabývám popisem konkrétní BPS a analýzou výroby elektrické energie, dodávané stanicí do distribuční VN sítě. Stanice byla uvedena do provozu v roce 2011 v rámci zemědělského družstva v Moravskoslezském kraji. V rámci podkapitol je přiblíženo technické řešení BPS, počínaje tvorbou bioplynu a konče dodávkou elektrické energie do elektrizační sítě. Součástí je vyhodnocení kvality generované elektrické energie dle naměřených hodnot v rozmezí jednoho měsíce.

### 7.1 Provozní řešení a technické parametry bioplynové stanice

Zemědělské družstvo (dále ZD) provozující BPS se mimo jiné zabývá chovem prasat. Prasata produkují kejdu, která společně s kukuřičnou siláží a cukrovarskými řízky tvoří kvalitní substrát. Na uskladnění kejdy ZD využívá třech nádrží, ze kterých je kejda posléze v požadovaném množství přečerpávána do dvou válcových fermentorů, přičemž každý pojme  $1630 \text{ m}^3$  biomasy. Minimální doba zdržení vstupního substrátu ve fermentoru je 75 dní. Oba fermentory mají jeden společný dofermentor o objemu  $1970 \text{ m}^3$ . Vzniklý plyn se drží v plynojemech o objemech  $2 \times 1307 \text{ m}^3$  a  $1 \times 1558 \text{ m}^3$ . Surový plyn z plynojemů je nutno před přívodem do motorů upravit. Dvě kondenzační jednotky se starají o odstranění vlhkosti z bioplynu a vedení skrze filtrační patrony s aktivním uhlím má odsiřující účinky. Zbavení bioplynu síry je důležité, neboť síra je velmi korozní. Vyčištěný plyn je poté přiváděn do jednotlivých kogeneračních jednotek.

BPS je vybavena celkem čtyřmi spalovacími motory, a sice jedním vznětovým motorem o výkonu  $340 \text{ kW}_E$  a třemi zážehovými motory o výkonu  $250 \text{ kW}_E$ . Původně byly zážehové motory pouze dva, třetí byl instalován až dodatečně, protože se BPS potýkala s přebytkem bioplynu, který se musel bez využití spalovat bezpečnostním hořákem. V dnešní době je tedy BPS vybavena instalovaným elektrickým výkonem o celkové hodnotě  $1090 \text{ kW}$ . Všechny motory jsou vybaveny synchronními motorgenerátory. Štítkové hodnoty generátorů jsou uvedeny v následující tabulce č. 9.

Tab. č. 9 - Štítkové hodnoty generátorů a jejich provozní spotřeby

Výrobce		Stamford	agrogen GmbH
Typ motoru		zážehový	vznětový
Zdánlivý výkon	$S \text{ (kVA)}$	310	340
Činný výkon	$P \text{ (kW)}$	250	340
Jmenovité napětí	$U_{Sn} \text{ (V)}$	400	400
Jmenovitý proud	$I_n \text{ (A)}$	448	490
Frekvence	$f \text{ (Hz)}$	50	50
Účinník	$\cos \varphi$	0,8	1
Spotřeba bioplynu	$\text{m}^3/\text{hod}$	106	142
Spotřeba oleje	$\text{kg}/\text{hod}$	3,5	4,5
Tepelný výkon	$\text{kW}_t$	232	320

V tabulce jsou mimo štitkových hodnot motorgenerátorů uvedeny také jejich spotřeby. Všechny čtyři kogenerační jednotky za hodinu provozu spotřebují  $460 \text{ m}^3$  bioplynu. Na výrobu jedné kilowatthodiny elektrické energie je tedy zapotřebí přibližně  $0,42 \text{ m}^3$  bioplynu.

Kogenerační jednotky jsou umístěny ve strojovně, kde se mimo nich nachází také zařízení pro řízení celé BPS. Na střeše strojovny jsou umístěny chladiče, které jsou využívány v letních měsících, kdy není zapotřebí výhřev budov. V netopné sezóně je možné vyprodukované teplo využít i efektivně, a sice k sušení obilí. V období zimních měsíců je teplo využito pro vytápění celého komplexu zemědělské společnosti skládajícího se z administrativní budovy, několika hal a chlívů. Okruh teplovodu je od vlastního okruhu kogeneračních jednotek oddělen deskovým výměníkem.

Vyrobený elektrický výkon je skrze transformovnu 0,4/22 kV veveden do venkovního vedení místního distributora elektrické energie. Transformovna je vybavena jedním transformátorem o výkonu 1250 kVA se jmenovitým proudem 1804 A.

V současné době je BPS téměř v nepřetržitém provozu na 95 % instalovaného výkonu. Výkon se dá v rámci dispečerského řízení snížit na hodnoty 75, 50 a 0 % jmenovitého výkonu. Toto rozhodnutí může přijít v případě potřeby od provozovatele distribuční sítě. [14]

## 7.2 Prostředky pro měření elektrické energie a analýzu její kvality

Pro měření a záznam časových průběhů generované elektrické energie se v praxi využívají tzv. analyzátoři, které navíc dokážou měřenou elektrickou energii po stránce její kvality zhodnotit. Česká firma ELCOM na trhu nabízí celou řadu kompaktních analyzátorů, které se liší svými provozními vlastnostmi a možnostmi a také způsobem zobrazení výstupních naměřených dat. K analýze elektrické energie ve vybrané BPS jsem měl k dispozici analyzátor BK-ELCOM ENA330. Analyzátor je vybaven čtyřmi napěťovými a proudovými vstupy, které byly připojeny na přípojnice v rozvaděči, kde byl po celou dobu měření díky svým malým rozměrům uschován. Elektrické proudy byly měřeny nepřímo pomocí proudových kleští. Analyzátor ENA330 je vybaven rozhraním EXT. AUX sloužící pro případné připojení dotykového displeje ENA331, který jsem ale k dispozici neměl. K ovládání analyzátoru jsem tak musel využít externí monitor a myš prostřednictvím rozhraní VGA a USB.

Fáze zážehových jednotek o výkonu  $250 \text{ kW}_E$  jsou na přípojnice přivedeny jednotlivými kabely. U vznětové jednotky pro její vyšší výkon  $340 \text{ kW}_E$  je vývod zajištěn dvěma kabely na fázi. K přípojnicím byl připojen také analyzátor, který v období od 9. ledna do 8. února 2014 každou minutu vzorkoval elektrické veličiny a ukládal je do digitální podoby. Z naměřených hodnot je analyzátor schopen vyhodnotit kvalitu elektrické energie na základě normy ČSN EN 50160.

### 7.2.1 Norma ČSN EN 50160

Jedná se o českou verzi evropské technické normy, jejíž poslední 3. edice byla vydána v únoru 2011 a která celým názvem zní: *Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejných distribučních sítí*. Norma udává meze nebo hodnoty charakteristických hodnot napětí, jaké může

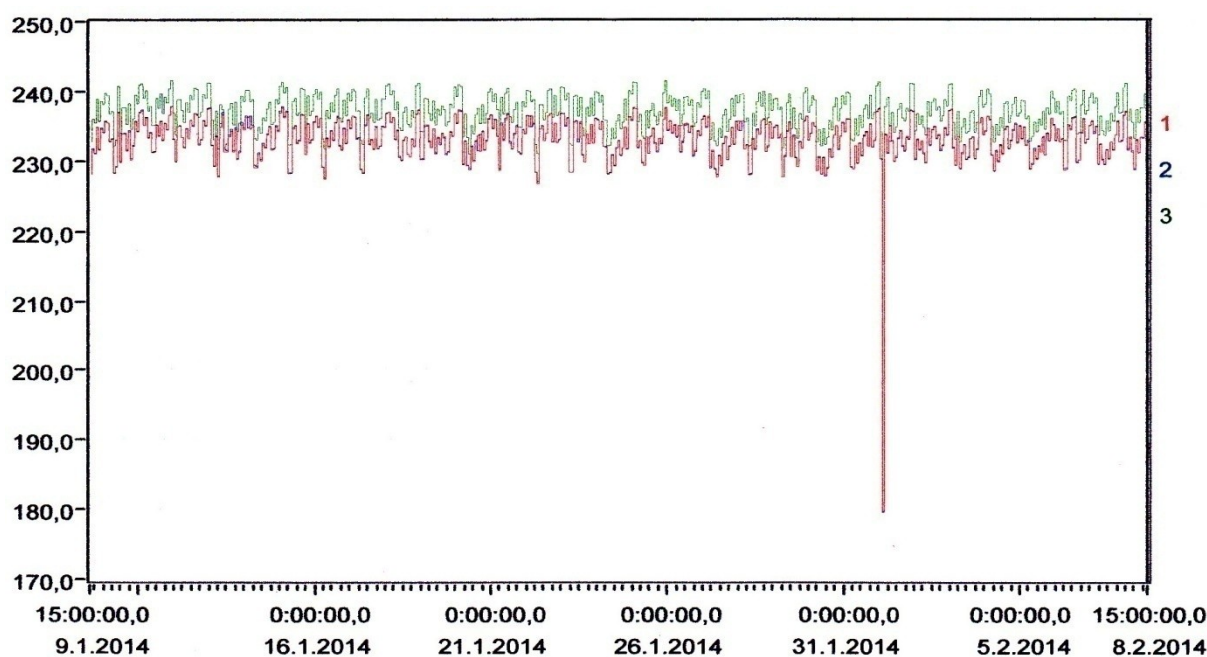
za normálních provozních podmínek očekávat kterýkoli uživatel sítě. Předmětem normy je tedy definování, popis a specifikace charakteristik napájecího napětí týkající se kmitočtu, velikosti, tvaru vlny a symetrie třífázových napětí. [16]

### 7.3 Vlastní analýza kvality generované elektrické energie

Vyrobenou elektrickou energii ZD prodává do elektrizační soustavy ČR. Otázka kvality prodávané elektrické energie je důležitá, a proto musí podléhat předem jasně daným podmínkám. V této kapitole jsou zobrazeny výsledky měsíčního měření a jejich vyhodnocení na základě zmíněné normy ČSN50160, dále jen normy. Analyzátor je schopen kvalitu energie podle normy zhodnotit sám a uvést tabulku, ve které udá, které parametry jak obstály. Pro názornost je však každý parametr individuálně uveden, zhodnocen a graficky podložen na základě naměřených výsledků.

#### 7.3.1 Velikost a odchylky napájecího napětí

Kritérium přijatelných odchylek napětí je dle normy následující: „Za normálních podmínek, kromě období s přerušením, odchylka napájecího napětí nemá přesáhnout  $\pm 10\%$  jmenovitého napětí  $U_n$ “. Jmenovité napětí generátorů je 230/400 V. Tolerované rozmezí hodnot fázového napájecího napětí je tedy 207 - 253 V.

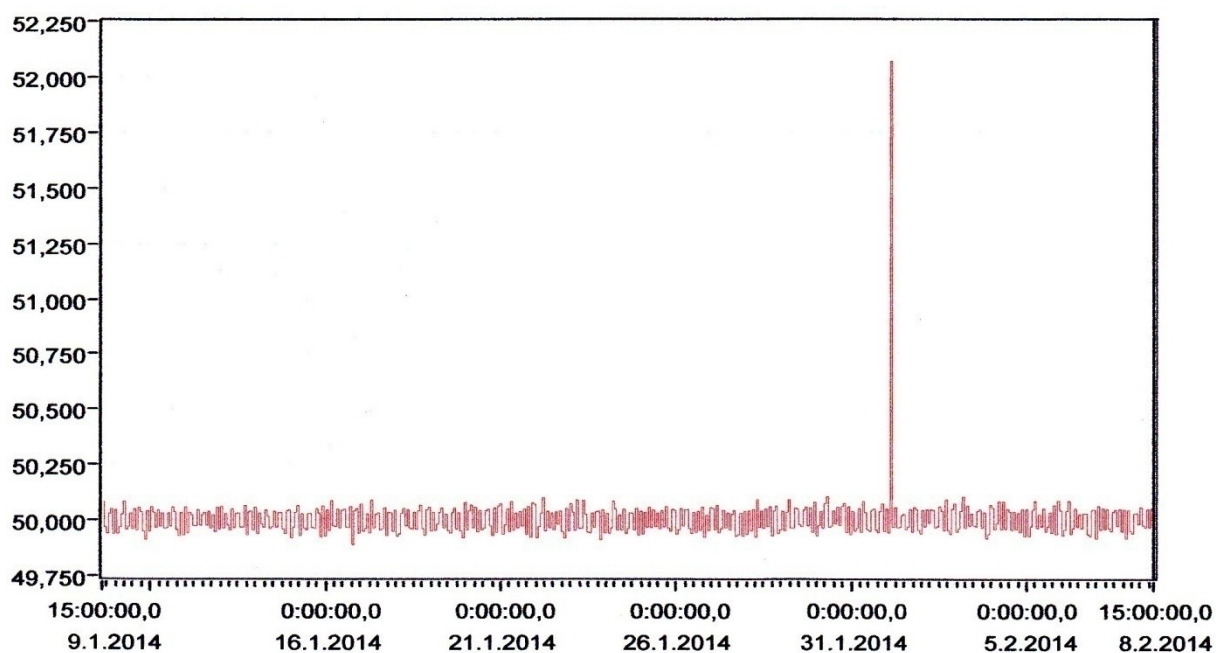


Obr. č. 16 - Průběh napětí (V)

Analyzátor za běžných provozních podmínek zaznamenal nejnižší hodnotu napětí 226,7 V, kterou naměřil dne 22.1 v 8:16. Naopak nejvyšší zaznamenaná hodnota napětí byla naměřena 11. 1. ve 2:26 a dosahovala hodnoty 241,5 V (viz. obr. č. 16). Dne 1.2. ve 2:47 byl sice zaznamenán pokles napětí na 180 V, jednalo se ale o poruchový stav, který se požadavkům normy vymyká. Lze tedy prohlásit, že napětí po celou dobu měření svou velikostí odpovídalo kritériím normy.

### 7.3.2 Kmitočet sítě

Norma definuje dva případy provozu sítě, přičemž jejich požadavky se mírně liší. První typ je systém se synchronním připojením k propojenému systému. To je případ měřené BPS, kde generovaná elektrická energie je dodávána do elektrizační soustavy. Norma udává, že během 99,5 % ročního provozu musí kmitočet nabývat hodnot  $50 \pm 1$  % Hz. Během provozu však kmitočet nikdy nesmí překročit hranici  $50 \text{ Hz} + 4 \text{ } / -6 \text{ } \%$ . Druhým typem je systém bez synchronního připojení k propojenému systému tzv. ostrovní režim. Tenhle druh provozu má nižší požadavky na dodržování odchylek kmitočtu, které mohou nabývat o něco vyšších hodnot.



Obr. č. 17 - Průběh frekvence (Hz)

Nejnižší hodnoty 49,89 Hz nabyl kmitočet 16.1 v 19:04 a svého naměřeného maxima dosáhl 3. 2. v 5:54, kdy hodnota byla 50,1 Hz. Oba extrémy jsou velice příznivé, rozmezí 49,5 - 50,5 Hz nebylo nikdy překročeno. Průběh velikosti frekvence je zaznamenán na obrázku č. 17. Dne 1. 2. ve 12:47 došlo k nárůstu kmitočtu na 52,07 Hz, jednalo se však o poruchový stav, který se do hodnocení kvality kmitočtu nezahrnuje. Můžeme tedy prohlásit, že kmitočet normě také vyhověl.

### 7.3.3 Harmonická napětí

Harmonické napětí je sinusové napětí s kmitočtem rovným celistvému násobku základního kmitočtu napájecího napětí. Harmonická napětí lze hodnotit jednotlivě a souhrnně.

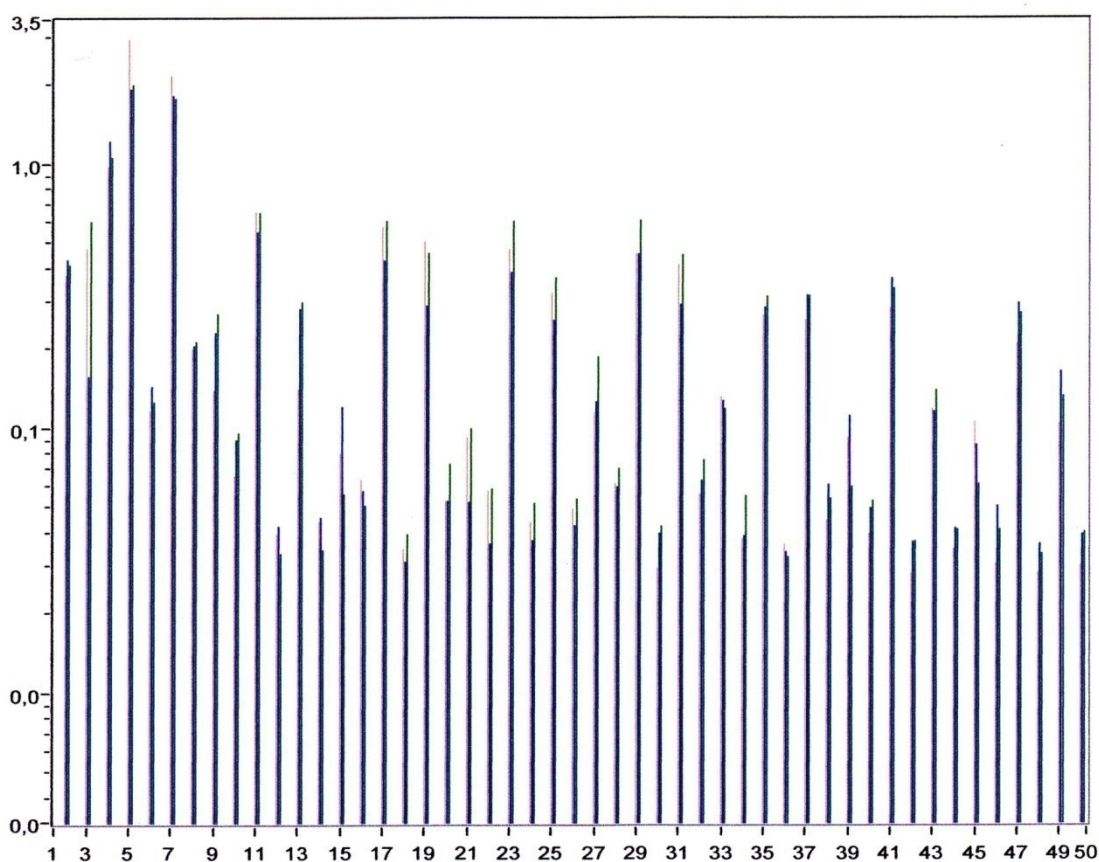
Jednotlivé hodnocení spočívá v porovnání relativních hodnot amplitud příslušných harmonických vztažených k základní harmonické prvního řádu. V tabulce č. 10 jsou pro každý řád  $n$ -té harmonické uvedeny tři hodnoty, a sice limitní hodnota ve voltech, maximální naměřená hodnota ve voltech a její odpovídající relativní velikost vůči první harmonické. Žádná z harmonických v průběhu měření svůj limit nepřekročila. Napětí je na obrázku č. 18 vykresleno ve frekvenční oblasti



pomocí FFT analýzy. Jsou zde zobrazeny vyšší harmonické až do 50. řádu, základní harmonická na obrázku uvedena není. Bezproblémový průběh ale nebyl u meziharmonických, kde analyzátor zaznamenal vysokou hodnotu 4,5 harmonické, což odpovídá frekvenci 225 Hz. Dle normy má tato harmonická nabývat maximálně hodnoty 0,2 %  $U_n$ , ve skutečnosti však byly naměřeny hodnoty 0,35 % ve fázi č. 1, 0,44 % ve fázi č. 2 a 0,38 % ve fázi č. 3.

Tab. č. 10 - Úrovně jednotlivých harmonických

Liché harmonické								Sudé harmonické			
Ne násobky 3				Násobky 3							
Řád harm.	Limit % $U_n$	Změřené max. (V)	% $U_n$	Řád harm.	Limit % $U_n$	Změřené max. (V)	% $U_n$	Řád harm.	Limit % $U_n$	Změřené max. (V)	% $U_n$
5	6	3,4	1,48	3	5	1,5	0,65	2	2	1	0,43
7	5	2,6	1,13	9	1,5	0,3	0,13	4	1	2	0,87
11	3,5	0,9	0,39	15	0,5	0,2	0,09	6..24	0,5	0,7	0,30
13	3	0,4	0,17	21	0,5	0,2	0,09				
17	2	0,9	0,39								
19	1,5	0,5	0,22								
23	1,5	0,7	0,30								
25	1,5	0,6	0,26								



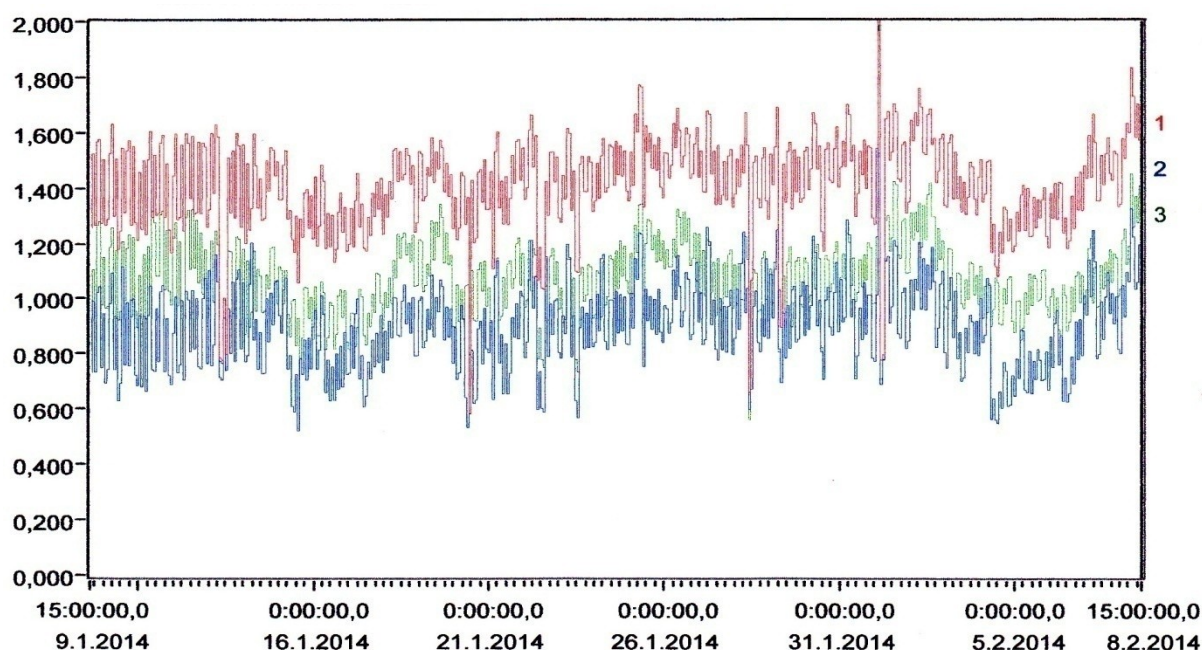
Obr. č. 18 - Průběh napětí ve frekvenční oblasti (V)



Při souhrnném hodnocení se využívá tzv. činitele celkového harmonického zkreslení THD:

$$THD = \sqrt{\sum_{h=2}^{40} (U_h^2)}$$

Norma udává: „Celkový činitel harmonického zkreslení THD napájecího napětí (zahrnující všechny harmonické až do řádu 40) musí být menší nebo roven 8 %“. Na obrázku č. 19 lze vidět, že činitel THD během měsíčního měření hodnotu 8 % nikdy nepřekročil. Nárůst THD během poruchového stavu ve dne 1.2. jsem na obrázku neuváděl resp. příslušná hodnota THD není v záběru okna, protože poruchový stav nemá na zhodnocení vliv.



Obr. č. 19 - Průběh činitele harmonického zkreslení THD (%)

#### 7.3.4 Nesymetrie napájecího napětí

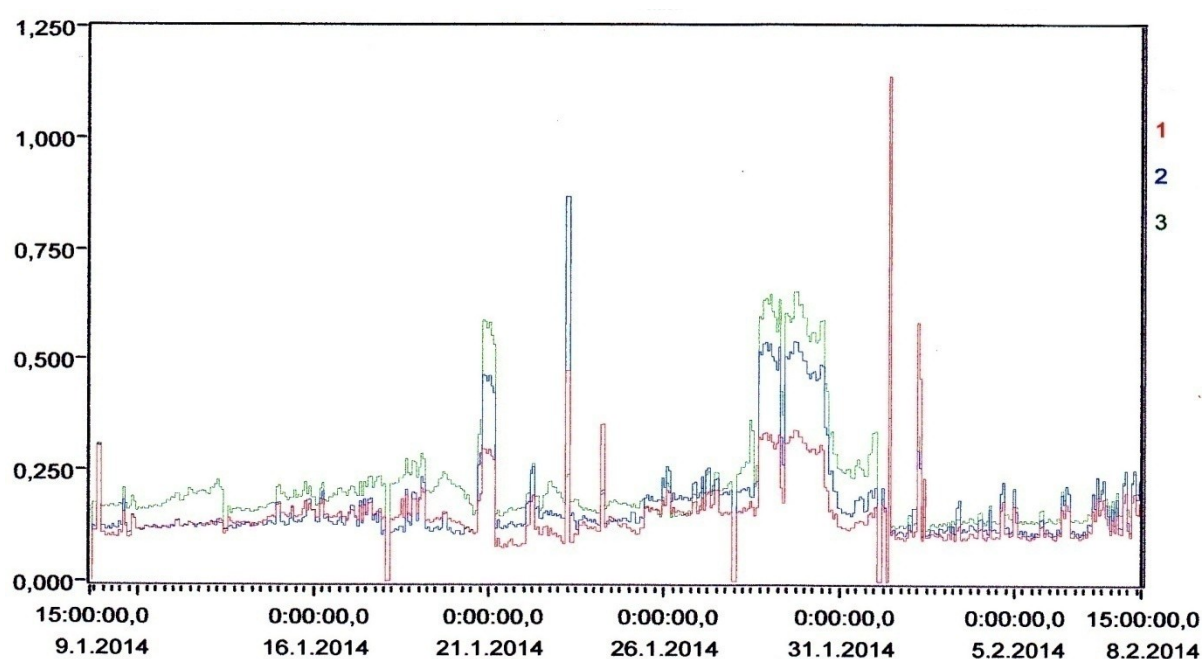
Nesymetrie napájecího napětí v trojfázových soustavách nastává, když jednotlivé fáze jsou zatěžovány rozdílně. Norma definuje: „Za normálních provozních podmínek musí být v libovolném týdenním období 95 % desetiminutových středních efektivních hodnot zpětné složky (základní) napájecího napětí v rozsahu 0 až 2 % sousledné složky“. Protože pro popis nesymetrie je zapotřebí znát zpětné složky impedancí zátěže, jejichž průběh nebyl ukládán, není možné ho graficky znázornit. Vycházím tedy z hodnot naměřených analyzátozem. Nejvyšší hodnota byla jen 0,15 % pro zpětnou a 1,14 % pro nulovou složku, takže hodnoty normě vyhověly.

### 7.3.5 Míra vjemu flikru

Flikr je zrakový vjem nestálosti jasu svítidel, který je zapříčiněn kolísáním napětí. Při určité hodnotě se flikr stává pro člověka nepříjemným. Rozlišujeme krátkodobou a dlouhodobou míru vjemu flikru. Krátkodobá míra  $P_{st}$  je měřena po dobu 10 minut. Dlouhodobá míra  $P_{lt}$  je počítána z posloupnosti dvanácti hodnot krátkodobé míry vjemu flikru, což odpovídá dvěma hodinám.

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\sum_{i=1}^{12} \frac{P_{sti}^3}{12}}$$

Povolená velikost je normou definovaná: „Za normálních provozních podmínek musí být po 95 % času, v libovolném týdenním období, dlouhodobá míra vjemu flikru  $P_{lt} \leq 1$ “.



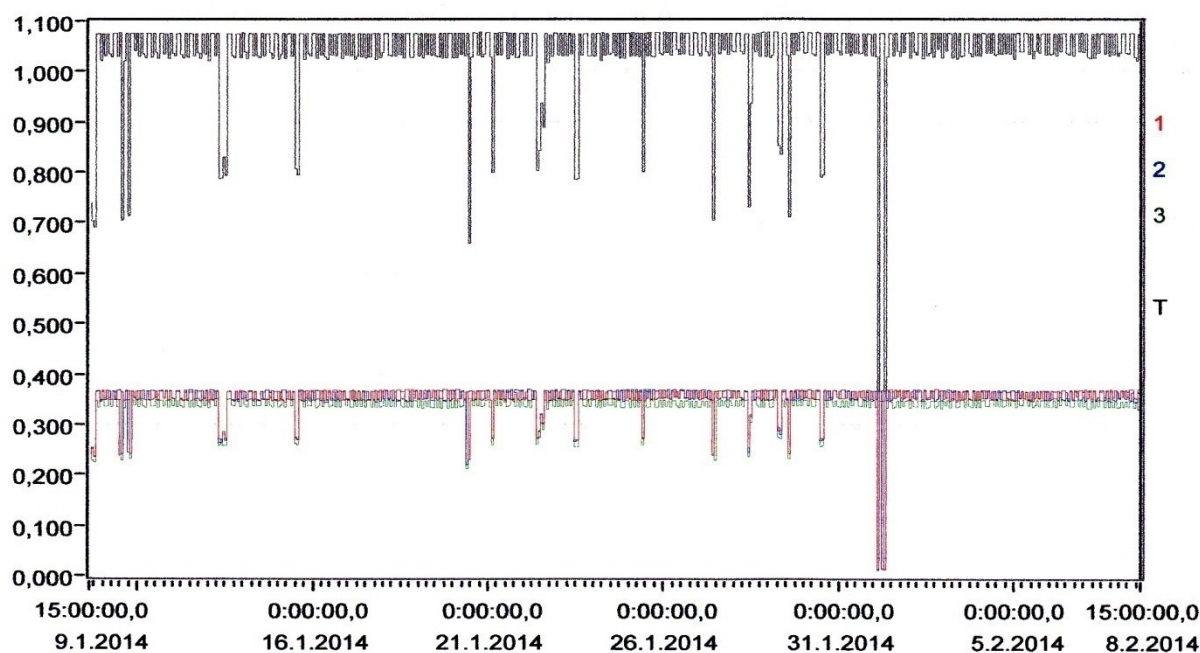
Obr. č. 20 - Průběh dlouhodobé míry flikru  $P_{lt}$

Z grafického průběhu dlouhodobé míry flikru zobrazeného na obrázku č. 20 lze vidět, jak se jeho hodnota v průběhu měsíce měnila. Tím, že hodnoty napětí se udržovaly bez vyšších výkyvů, tak míra dlouhodobého vjemu flikru nabývá ve větší části měsíce velmi nízkých hodnot. Hodnota  $P_{lt} = 1$  byla překročena pouze v den poruchového stavu. Lze tedy říci, že i flikr normě vyhověl.

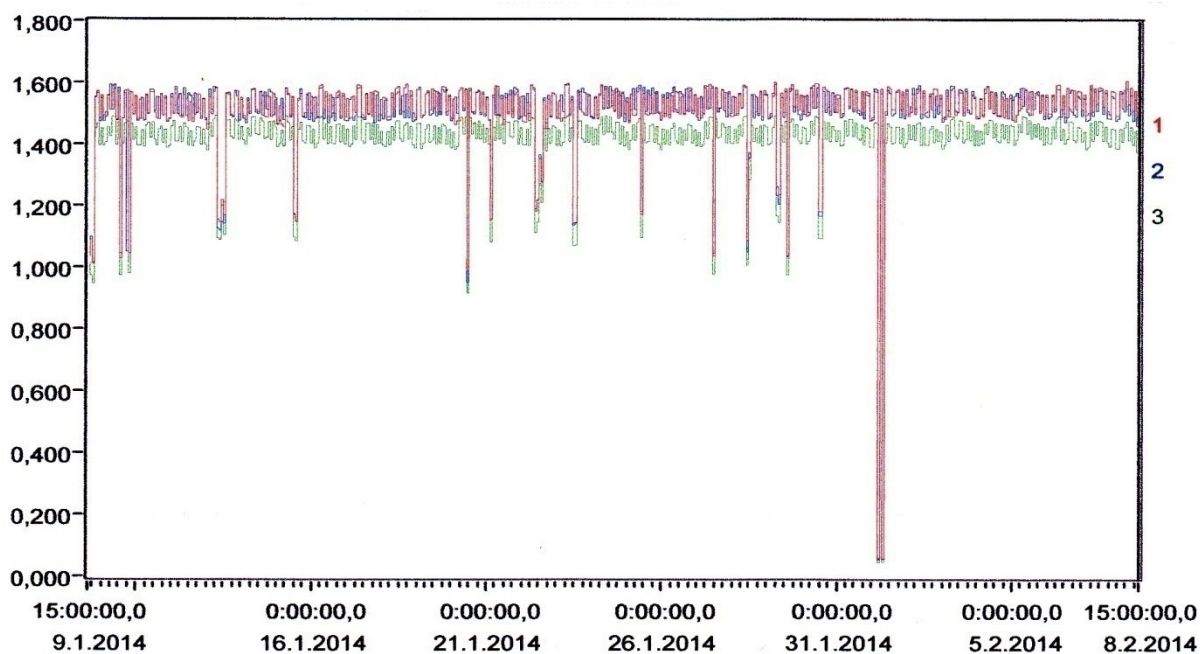
### 7.4 Výkon dodaný do elektrizační soustavy

Jak již zbylo zmíněno v úvodu kapitoly, BPS je téměř v nepřetržitém provozu. Všechny čtyři kogenerační jednotky trvale pracují na 95 % instalovaného výkonu.

Na obrázku č. 21 lze vidět průběhy zdánlivých výkonů v jednotlivých fázích (rozlišeny barevně) a jejich součet (označen černě). Tento součet pak představuje celkový výkon dodávaný do elektrizační soustavy. Uvedený výkon je zdánlivý v MVA. Pro lepší náhled jsou na obrázku č. 22 zobrazeny také průběhy proudů v jednotlivých fázích.



Obr. č. 21 - Průběh zdánlivého výkonu (MVA) dodávaného do ES



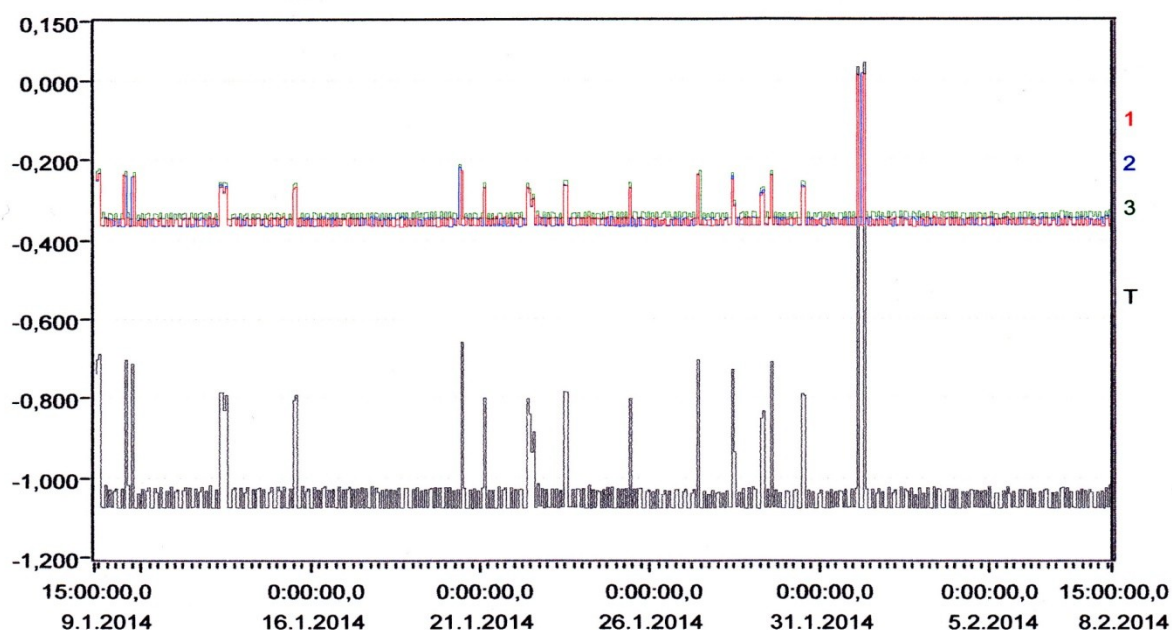
Obr. č. 22 - Průběhy proudů (kA)

Je zřejmé, že během měření docházelo k poklesům výkonů. Tyto poklesy mohly být zapříčiněny z mnoha důvodů, jako jsou například poruchy, kritické situace, servisní údržba nebo vedlejší provozní okolnosti (nedostatek plynu, jeho špatná kvalita atp.). ZD provozující BPS si vede deník, do kterého veškeré neobvyklé provozní situace včetně údržby zařízení zapisuje, aby v případě nutnosti mělo zpětný přehled. Na základě tohoto deníku je vytvořena tabulka č. 11, v níž jsou uvedeny všechny situace, kdy došlo k poklesu výkonu. U každé takové situace je uvedeno datum, čas, velikost výkonového poklesu a jeho příčina.

Tab. č. 11 - Seznam situací, při nichž došlo k poklesu generovaného výkonu

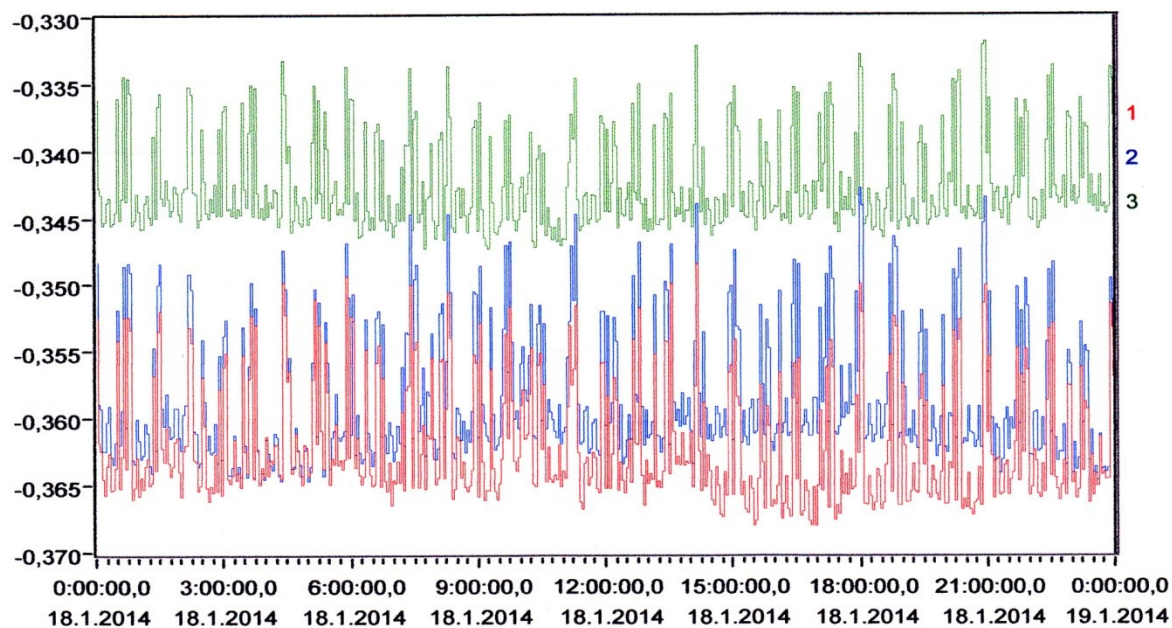
Datum	Čas stavu	Doba stavu	Pokles výkonu na	Příčina
9.1.	15:00 - 21:00	5 hod	700 kVA	Zvýšená teplota KGJ1 - doplnění chlad. kap.
10.1.	13:00 - 14:00	1 hod	700 kVA	Výměna uhlí ve filtračních patronách
	18:30 - 19:30	1 hod	750 kVA	Výměna plynového filtru KGJ2
13.1.	8:15 - 13:15	5 hod	800 kVA	Nedostatek bioplynu
15.1.	11:45 - 14:15	2 hod, 30 min	800 kVA	Nedostatek kejdy
20.1.	9:45 - 11:30	1 hod, 45 min	650 kVA	Oprava čerpadla
21.1.	2:30 - 3:45	1 hod, 15 min	800 kVA	(Neuvedeno)
22.1.	8:00 - 14:00	6 hod	850 kVA	Nedostatek plynu, snížení výkonu KGJ 1 a 2
23.1.	10:30 - 14:15	3 hod, 45 min	800 kVA	Nedostatek plynu, KGJ 3 vypnuta
25.1.	10:15 - 11:00	45 min	800 kVA	Doplnění chladicí kapaliny v KGJ 4
27.1.	10:00 - 12:00	2 hod	750 kVA	(Neuvedeno)
28.1.	10:15 - 13:15	3 hod	900 kVA	Špatná kvalita plynu - recirkulace
29.1.	7:15 - 9:45	2 hod, 30 min	850 kVA	Zvýšená teplota KGJ3 - doplnění chlad. kap.
	14:30 - 15:00	30 min	750 kVA	Kontrola tlaku KG3
30.1.	12:00 - 14:15	2 hod, 15 min	850 kVA	Kontrola měničů
1.2.	2:30 - 4:45	2 hod, 15 min	38 kVA	Výpadek napájení
1.2.	7:45 - 8:30	45 min	36 kVA	Výpadek napájení

Činný výkon dodávaný do elektrizační sítě znázorněn na obrázku č. 23. Nabývá záporných hodnot, protože je do sítě dodáván. Detail činného výkonu na obrázku č. 24 je vyobrazen ze dne 18. ledna, kdy se BPS nepotýkala s žádným problémem a pracovala na běžný provozní výkon.



Obr. č. 23 - Průběh činného výkonu (MW)

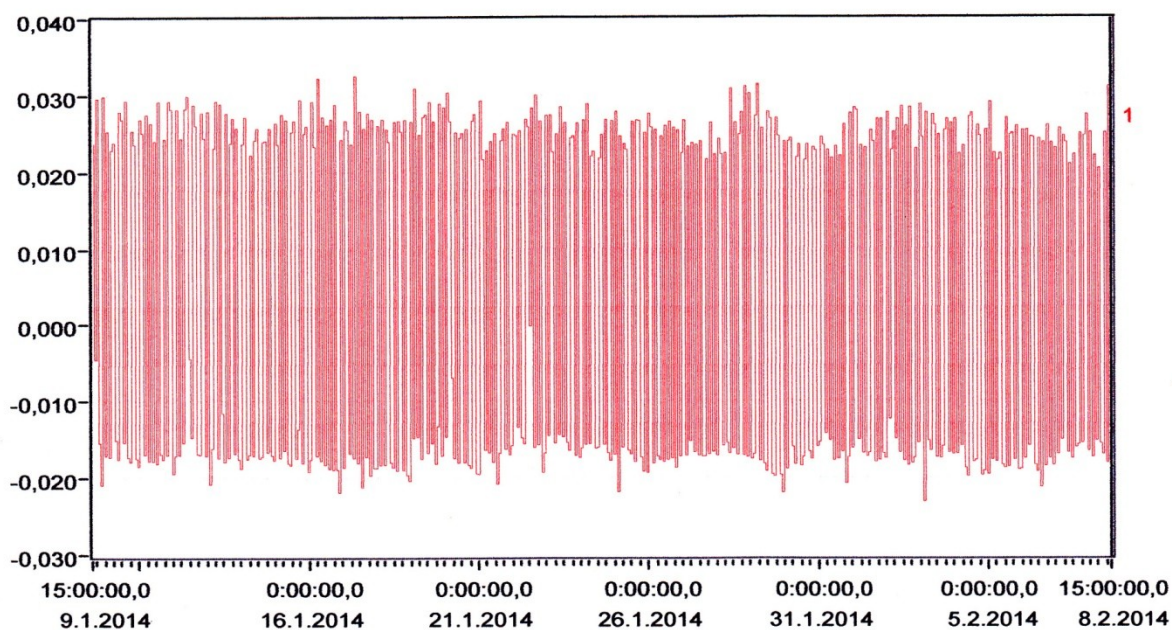




Obr. č. 24 - Dodávka činného výkonu (MW) během dne 18. 1. 2014

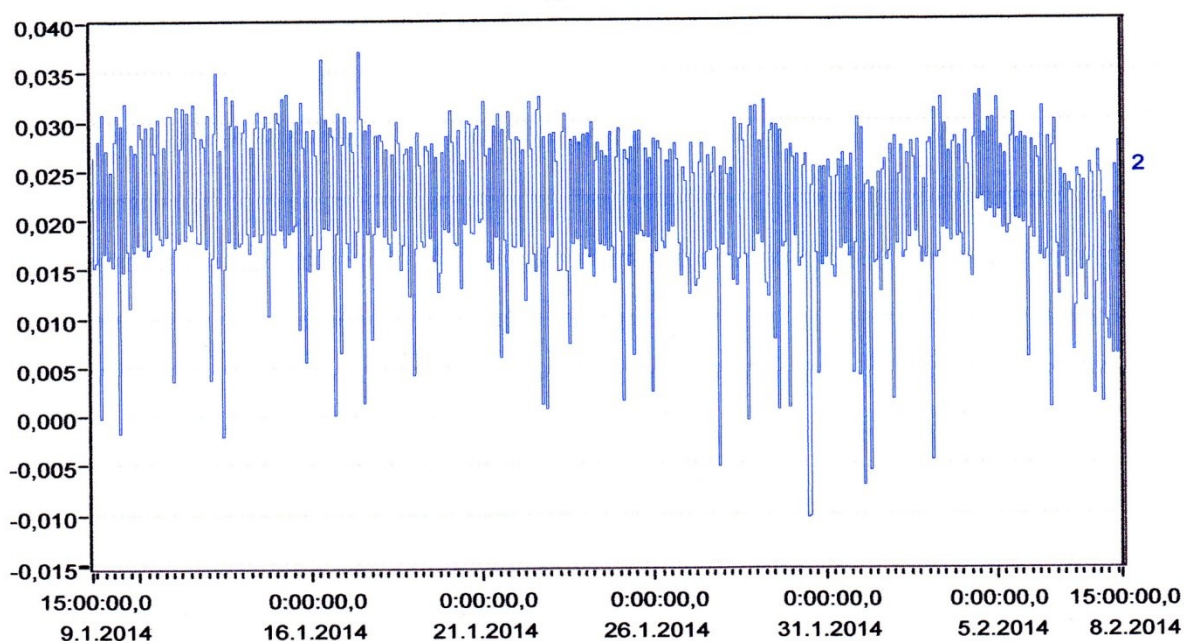
Z obrázku č. 24 je patrné, že generovaný výkon není ve všech fázích zcela symetrický. Nejnižší činný výkon dodává fáze č. 3, jež také pracuje s nižším proudem (viz obr. č. 22) pod vyšším napětím (viz obr. č. 16). Činné výkony fází č. 1 a 2 si jsou již víceméně podobné, jejich vzájemná odchylka je v řádech jednotek kW. Oproti fázi č. 3 však do sítě dodávají přibližně o 20 kW více.

Fáze se také liší v průbězích jalového výkonu. Na obrázku č. 25 je znázorněn průběh jalového výkonu ve fázi č. 1. Pohybuje se v rozmezí přibližně od -15 do 25 kVAr. Záporné hodnoty odpovídají kapacitnímu charakteru, tzn., že jalový výkon byl do sítě dodáván, kdežto u kladných hodnot mají hodnoty induktivní charakter, takže jalový výkon byl naopak ze sítě odebírán.



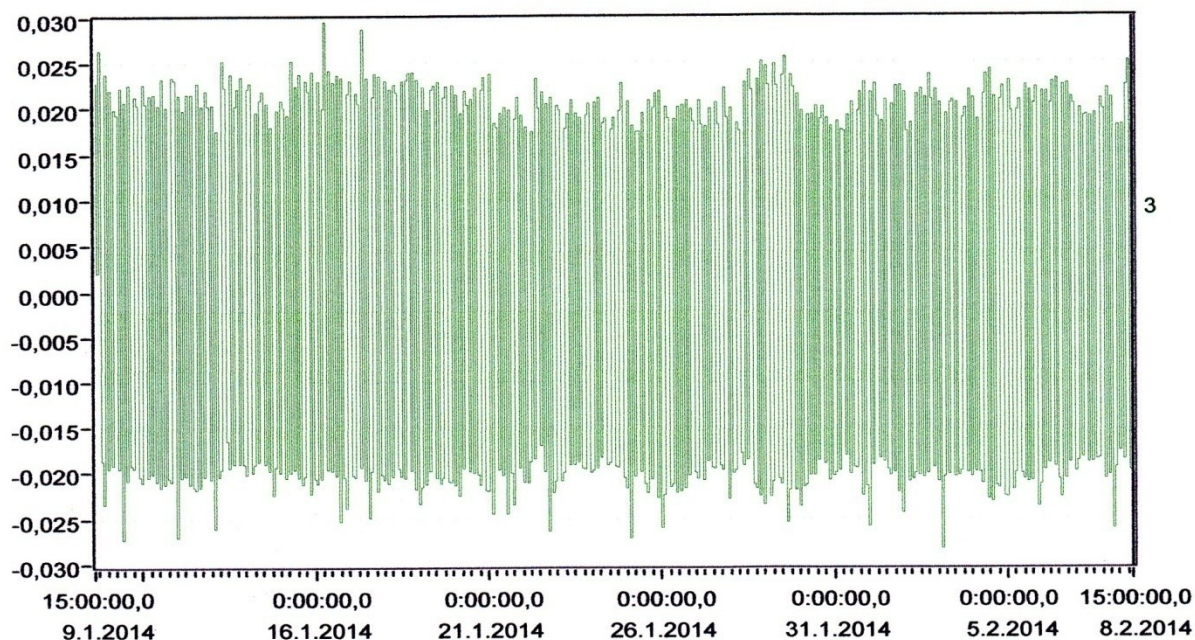
Obr. č. 25 - Průběh jalového výkonu ve fázi č. 1 (MVar)

Jalový výkon ve fázi č. 2 měl téměř po celou dobu měření pouze induktivní charakter, z toho vyplývá, že byl ze sítě pouze odebírán. Nabýval hodnot přibližně od 15 kVAr do 30 kVAr. Průběh jalového výkonu ve fázi č. 2 je zobrazen na obrázku č. 26.



Obr. č. 26 - Průběh jalového výkonu ve fázi č. 2 (MVar)

Třetí fáze stejně jako ta první během měření svůj charakter neustále měnila. Jalový výkon tak ve třetí fázi neustále kmital mezi hodnotami cirká -20 až 20 kVAr (viz. obr. č. 27).



Obr. č. 27 - Průběh jalového výkonu ve fázi č. 3 (MVar)

## 7.5 Shrnutí

Z měsíčních naměřených výsledků je patrné, že využití BPS a jejích kogeneračních jednotek je téměř maximální možné. Jasně to vychází z úvahy, že ZD má zájem o co nejvyšší výdělek z prodeje elektřiny a zároveň také o maximální možné zpracování odpadního materiálu.

Obecně je proplácen pouze výkon činný a jalový nikoli. Jalový výkon je důležitý u strojů, jako jsou transformátory či asynchronní motory, kde je jalový proud nutný pro jejich magnetizaci. Jiné využití ale nemá a jeho přenášením ve vedení vznikají pouze nežádoucí ztráty, proto je všeobecně zavedena snaha o jeho snížení. To lze docílit kompenzací, kterou lze realizovat několika způsoby. V uváděné BPS je kompenzace řešena pomocí kondenzátorových baterií, které lze spatřit v jednopólovém schématu zapojení BPS. Toto schéma a fotografie zobrazující některé důležité technické části BPS je k nahlédnutí v přílohách.



## 8 Závěr

Bioplyn bezesporu patří mezi alternativní zdroje energie, jež skýtají velké množství využití. Mezi základní výhody patří fakt, že vstupní látka, ze které se energie získává, bývá nejčastěji odpad. Tento odpad by byl člověkem nebo přírodou vyprodukován nezávisle na tom, zda bude dále využit či nikoli. Využití tedy člověku přináší jakousi energii navíc, aniž by musel nakupovat a spalovat fosilní paliva jako je uhlí, zemní plyn či ropné produkty. Odpad jako palivo ale také obnáší i jisté negativa. S rostoucím výkonem kogenerační jednotky zároveň roste i množství odpadu, které je nutno poblíž jednotky skladovat a zpracovávat. To obnáší zvýšenou míru zápachu a v případě udržování živočišné kejdy i zdraví škodlivé zárodky. Tyto aspekty je nutné respektovat a technologii výroby bioplynu tomu uzpůsobit, aby se jejich míra dostatečně minimalizovala.

V závislosti na použitém typu primární jednotky umožňuje spalování bioplynu slušnou míru regulace dodávaného výkonu. Kogenerační jednotky vybavené spalovacími motory mohou během pár minut naběhnout a v případě potřeby dodávat elektrickou energii. Stále se však v porovnání s elektrárnami na fosilní paliva jedná o malé výkony, takže vyrobená energie má pouze omezené možnosti. Výroba je však plánovatelná a není závislá na počasí, proto oproti jiným druhům alternativní výroby elektrické energie, jako jsou fotovoltaické či větrné elektrárny, je bioplyn výhodný v předvídatelnosti jeho použití. Využití bioplyn nachází také v záložních zdrojích elektrické energie, tomu jsou uzpůsobeny například mobilní kogenerační jednotky s plynovou spalovací turbínou, které mají podobu přívěsu nákladního vozu.

Co se týká měření elektrické energie generované uváděnou bioplynovou stanicí, tak je třeba závěrem zhodnotit výsledky. Z hlediska velikosti napětí, frekvence a míry vjemu flikru bylo měřením prokázáno, že parametry požadavkům normy ČSN EN 15060 vyhověly. Z přiložených průběhů lze pozorovat, jak se činné i jalové výkony v jednotlivých fázích mírně lišily, což také zapříčinilo nižšího napětí ve třetí fázi. Odlišnost byla však v toleranci, analyzátor vyhodnotil míru nesymetrie napájecího napětí jako normě vyhovující. Kritéria normy nesplnila pouze vyšší harmonická napětí, konkrétně mezipharmonická 4,5. řádu. Kvůli tomuto pochybení označil analyzátor celé měření jako nevyhovující. Pro větší přesnost by bylo vhodné měření provádět delší dobu než pouze jeden měsíc. Kdyby se měřilo například po dobu jednoho roku, výsledky by ukázaly, zda by se chyba opakovala pravidelně nebo šlo pouze o výjimečnou situaci.



## Použitá literatura

### Knihy

- [1] SCHULZ, Heinz a Barbara EDER. *Bioplyn v praxi*. Ostrava: HEL, 2004. ISBN 80-86167-21-6.
- [2] STRAKA, František. *Bioplyn*. 3. vyd. Praha: GAS, 2010. ISBN 978-80-7328-235-6.
- [3] *Průvodce výrobou a využitím bioplynu*. Praha: CZ Biom, 2009. ISBN 978-80-903777-5-2
- [4] DVORSKÝ, Emil a Pavla HEJTMÁNKOVÁ. *Kombinovaná výroba elektrické a tepelné energie*. Praha: BEN, 2005. ISBN 80-7300-118-7
- [5] KRBEK, Jaroslav a Bohumil POLESNÝ. *Malé kogenerační jednotky v komunální a průmyslové energetice*. Brno: PC-DIR Real, s.r.o., 1999. ISBN 80-85895-23-4.

### Internetové zdroje

- [6] *Bioplynová stanice* [online]. © 2008- [cit. 2013-11-20]. Dostupné z: <http://www.nazeleno.cz/bioplynova-stanice.dic>
- [7] JENÍČEK, Pavel: *Produkce bioplynu z průmyslových odpadních vod*. *Biom.cz* [online]. 2005-09-05 [cit. 2013-11-22]. Dostupné z: <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/produkce-bioplynu-z-prumyslovych-odpadnich-vod>
- [8] *Skládkový plyn* [online]. © 2009- [cit. 2013-11-28]. Dostupné z: [http://biomasstechnology.cz/wp/?page\\_id=239](http://biomasstechnology.cz/wp/?page_id=239)
- [9] ŠKORVAN, Ondřej. *Suchou, nebo mokrou fermentaci?* [online]. 15. 2. 2012 [cit. 2013-12-3]. Dostupné z: <http://odpady.ihned.cz/c1-54680800-suchou-nebo-mokrou-fermentaci>
- [10] *Technologie mokré anaerobní fermentace* [online]. © 2009- [cit. 2013-12-4]. Dostupné z: [http://bioplyncs.cz/technologie\\_mokre\\_anaerobni\\_fermentace](http://bioplyncs.cz/technologie_mokre_anaerobni_fermentace)
- [11] BIOPROFIT. *Anaerobní technologie* [online]. © 2007- [cit. 2013-12-8]. Dostupné z: [http://www.bioplyn.cz/at\\_popis.htm](http://www.bioplyn.cz/at_popis.htm)
- [12] TRÁVNÍČEK, Petr, KARAFIÁT, Zbyšek: *Kogenerace pomocí plynových spalovacích motorů*. *Biom.cz* [online]. 2009-04-15 [cit. 2014-02-10]. Dostupné z: <http://biom.cz/cz/odborne-clanky/kogenerace-pomoci-plynovych-spalovacich-motoru>

- [13] *Mikroturbína* [online]. © 2012-2013 [cit. 2014-03-17]. Dostupné z:  
<http://www.mikroturbina.cz/mikroturbina.htm>
- [14] Janša, J., Hradílek, Z., Moldřík, P.: Energy Rating of Biogas Station. Sborník konference Forecasting in Electric Power Engineering (PE 2013), Wydawnictwo Politechniki Czestochowskiej, Polsko, 2013.
- [15] ČESKÁ BIOPLYNOVÁ ASOCIACE. *Výroba elektřiny z bioplynu meziročně vzrostla v ČR o téměř 60 procent* [online]. 2. 4. 2014 [cit. 2014-04-24]. Dostupné z:  
<http://www.czba.cz/aktuality/vyroba-elektriny-z-bioplynu-mezirocne-vzrostla-v-cr-o-temer-60-procent.html>

### Normy

- [16] ČSN EN 50160. *Charakteristiky napětí elektrické energie dodávané z veřejných distribučních sítí*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.

## Seznam obrázků

- Obr. č. 1 - Průřez bioplynovou stanicí typu Reusch
- Obr. č. 2 - Schematické zobrazení anaerobního rozkladu
- Obr. č. 3 - Princip dávkové metody
- Obr. č. 4 - Princip metody střídání nádrží
- Obr. č. 5 - Princip průtokové metody
- Obr. č. 6 - Princip zásobníkové metody
- Obr. č. 7 - Princip kombinované průtokové metody se zásobníkem
- Obr. č. 8 - Zjednodušené schéma BPS s mokrou fermentací
- Obr. č. 9 - BPS se suchou fermentací (diskontinuální technologie)
- Obr. č. 10 - Porovnání oddělené a kombinované výroby elektrické energie a tepla
- Obr. č. 11 - Schéma parních turbín
- Obr. č. 12 - Plynová spalovací turbína
- Obr. č. 13 - Regenerace tepla spalovacího motoru
- Obr. č. 14 - Řez Stirlingovým motorem
- Obr. č. 15 - Kyslíko-vodíkový palivový článěk
- Obr. č. 16 - Průběh napětí (V)
- Obr. č. 17 - Průběh frekvence (Hz)
- Obr. č. 19 - Průběh činitele harmonického zkreslení THD (%)
- Obr. č. 20 - Průběh dlouhodobé míry flikru Plt
- Obr. č. 21 - Průběh zdánlivého výkonu (MVA) dodávaného do ES
- Obr. č. 22 - Průběhy proudů (kA)
- Obr. č. 23 - Průběh činného výkonu (MW)
- Obr. č. 24 - Dodávka činného výkonu (MW) během dne 18. 1. 2014
- Obr. č. 25 - Průběh jalového výkonu ve fázi č. 1 (MVar)
- Obr. č. 26 - Průběh jalového výkonu ve fázi č. 2 (MVar)
- Obr. č. 27 - Průběh jalového výkonu ve fázi č. 3 (MVar)

## Seznam tabulek

- Tab. č. 1 - Specifický výnos bioplynu a obsah metanu
- Tab. č. 2 - Průměrné složení bioplynu
- Tab. č. 3 - Obsah sušiny, výtěžek plynu a obsah metanu statkových hnojiv
- Tab. č. 4 - Obsah sušiny, výtěžek plynu a obsah metanu energetických plodin
- Tab. č. 5 - Obsah sušiny, výtěžek plynu a obsah metanu substrátů ze zemědělského průmyslu
- Tab. č. 6 - Míra energetického potenciálu bioplyn v jednotlivých průmyslových odvětvích
- Tab. č. 7 - Obsah sušiny, výtěžek plynu a obsah metanu komunálních odpadů
- Tab. č. 8 - Vybrané výhody/nevýhody u jednotlivých typů primárních jednotek
- Tab. č. 9 - Štítkové hodnoty generátorů a jejich provozní spotřeby
- Tab. č. 10 - Úrovně jednotlivých harmonických
- Tab. č. 11 - Seznam situací, při nichž došlo k poklesu generovaného výkonu

**Seznam příloh**

Příloha č. 1 - Fotografie fermentorů

Příloha č. 2 - Fotografie strojovny

Příloha č. 3 - Fotografie zařízení pro úpravu kvality bioplynu - odvlhčení a odsíření

Příloha č. 4 - Fotografie kioskové trafostanice 0,4/22 kV

Příloha č. 5 - Fotografie rozvaděče se zapojeným analyzátozem

Příloha č. 6 - Jednopolové schéma zapojení BPS

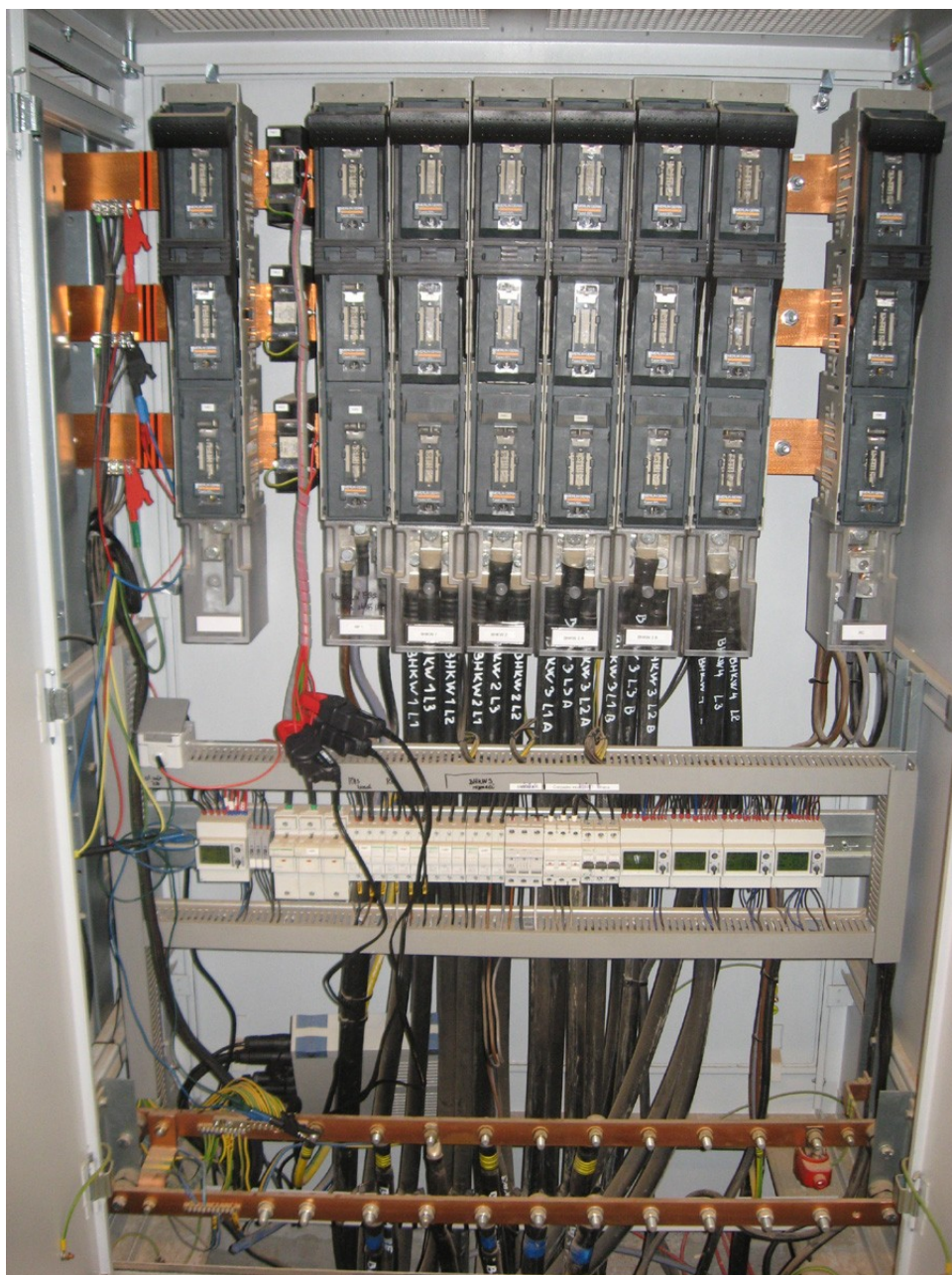
## PŘÍLOHY

**Příloha č. 1 - Fotografie fermentorů****Příloha č. 2 - Fotografie strojovny (v popředí KGJ o výkonu 340 kW<sub>E</sub>)**



**Příloha č. 3 - Fotografie zařízení pro úpravu kvality bioplynu - odvlhčení a odsíření****Příloha č. 4 - Fotografie kioskové trafostanice 0,4/22 kV**



**Příloha č. 5 - Fotografie rozvaděče se zapojeným analyzátozem**

## Příloha č. 6 - Jednopolové schéma zapojení BPS

